

ISSN: 3041-9638¹
<https://jrpsm.asnrkh.ac.ir/>



Open Access

Research Article

Evaluation of Seed Priming on Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Germination Behavior and Enzymatic Activities Under Lead Nitrate Stress Conditions

F. Jahanbakhshi¹, A. Abdali Mashhadi¹ , S. A. Moosavi¹ and A. Lotfi Jalal Abadi¹

¹Department of Production and Plant Genetics Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran.

Received: 12 Feb 2026

Accepted: 19 Jun 2026

Published: 19 Jun 2026

Corresponding Author:

Alireza Abdali Mashhadi

Email:

alirezaabdali@asnrkh.ac.ir

Keywords:

Seedling establishment, Oxidative stress, Atomic absorption, Heavy metals, Catalase, Ion toxicity.

Citation:

Jahanbakhshi, F., Abdali Mashhadi, A., Moosavi, S. A., & Lotfi Jalal Abadi, A. (2026). Evaluation of seed priming on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germination behavior and enzymatic activities under lead nitrate stress conditions. *Journal of Research in Plant Metabolites*, 4(1), 63-83.

Doi: 10.22034/jrpsm.2026.583542.1115

Extended Abstract

Background and Objective: In recent decades, the increasing concentration of heavy metals in agricultural soils due to industrial and anthropogenic activities has emerged as a major environmental challenge. Lead (Pb), as one of the most persistent and toxic heavy metals, exerts destructive effects on early growth stages, particularly germination and seedling establishment, by inducing oxidative stress, disrupting water uptake, and impairing metabolic activities. Quinoa, a pseudo-cereal with high nutritional value and resilience to adverse conditions, holds great promise for cultivation in stressed environments; however, it remains sensitive to Pb toxicity during its early growth phases. Seed priming technology represents a modern and cost-effective strategy to address this challenge. Despite various studies, the simultaneous efficiency of different iron sources (especially nanoparticles) and calcium in mitigating Pb toxicity in Quinoa has received limited attention. Therefore, this study aimed to evaluate and compare the effects of priming with nano-iron, iron chloride, and calcium sulfate on germination indices, antioxidant defense system activity, and Pb accumulation in Quinoa seedlings.

Materials and Methods: This factorial experiment, based on a completely randomized design with three replications, was conducted in 2024 at the Seed Technology Laboratory of Khuzestan University. Priming treatments included iron chloride ($FeCl_3$) and nano-iron at 0, 4, 6, 8, and 10 mg/kg, and calcium sulfate ($CaSO_4$) at 0, 0.5, 1, 1.5, and 2 mM. Seeds were immersed for 6 hours. After priming, seeds were exposed to Pb nitrate stress levels (0, 20, 40, 80, and 100 mg/kg) in a germinator. Germination was monitored daily for one week. Morphological parameters (radicle and plumule length) were measured using Digimizer software. Standard indices, germination percentage (GP), germination rate (GR), mean germination time (MGT), and seedling vigor index (SVI) were calculated. Antioxidant enzyme activities (catalase, CAT; peroxidase, POD) were measured spectrophotometrically. Pb accumulation in tissues was determined via atomic absorption spectrophotometry after acid digestion. Statistical analysis used SAS software, with means compared using LSD test ($P < 0.05$). The slicing method analyzed interaction effects at different stress levels.

Findings: Analysis of variance results indicated that all studied indices were significantly affected by both Pb stress and priming treatments. Increased lead nitrate concentrations led to a sharp decline in GP, GR, and SVI, while significantly increasing MGT. Conversely, priming treatments neutralized a major portion of these inhibitory effects. $CaSO_4$ at 1–2 mM was the superior treatment for improving germination indices, maintaining a germination percentage of 93% even under the highest Pb stress level. Regarding morphological traits, iron priming exhibited higher efficiency. Nano-iron at 6 mg/kg had the most significant impact on enhancing plumule and radicle length under mild and moderate stress, while $FeCl_3$ at 10 mg/kg performed better in maintaining seedling vigor under severe stress conditions. Biochemical assessments revealed that as Pb stress intensified, the activities of CAT and POD increased as a defense mechanism. Priming treatments (especially 10 mg/kg $FeCl_3$ and 2 mM $CaSO_4$) significantly boosted these enzyme activities compared to the non-primed control, contributing to reduced oxidative damage and enhanced cell membrane stability. Another crucial finding was the impact of priming on heavy metal content; atomic absorption analysis demonstrated that priming with 10 mg/kg $FeCl_3$ reduced Pb accumulation in seedling tissues by approximately 48% at the highest stress level. This phenomenon may be results from the competitive inhibition between iron and lead ions at uptake sites and improved membrane integrity in primed seeds.

Conclusion: This research confirmed that while lead stress imposes severe constraints on the early establishment of quinoa, seed priming with calcium and iron elements serves as an efficient strategy to mitigate this toxicity. Calcium sulfate not only improves primary physical and enzymatic processes through calcium ions but also contributes to lead detoxification via its sulfate moiety; by providing the essential sulfur foundation required to strengthen the antioxidant defense system, it effectively ensures optimal germination speed and percentage. Conversely, iron priming (particularly nano-iron at low doses and iron chloride at high doses) stimulates seedling growth and enhances seed vigor. Notably, $FeCl_3$ exhibited a distinct superiority in promoting enzymatic activities (catalase and peroxidase), demonstrating significant efficiency in boosting the antioxidant defense system and restricting the excessive entry of lead into plant tissues. Consequently, the application of these priming treatments is recommended for improving quinoa establishment in soils contaminated with heavy metals.



ارزیابی پرایمینگ بذر بر رفتار جوانه‌زنی گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) و فعالیت‌های آنزیمی

در شرایط تنش نیترات سرب

فاطمه جهانبخشی^۱، علیرضا ابدالی مشهدی^{۱b}، سید امیر موسوی^۱ و امین لطفی^۱

^۱گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران.

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: در دهه‌های اخیر، افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی به دلیل فعالیت‌های صنعتی و انسانی، به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی تبدیل شده است. سرب، از پایدارترین و سمی‌ترین فلزات سنگین، با ایجاد تنش اکسیداتیو، اختلال در جذب آب و اختلال در فعالیت‌های متابولیکی، تأثیرات مخربی بر مراحل اولیه رشد، به‌ویژه جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه دارد. کینوا، یک شبه‌غله با ارزش غذایی بالا و مقاوم به شرایط نامساعد، پتانسیل خوبی برای کشت در مناطق تحت تنش دارد، اما در مراحل اولیه رشد به سمیت سرب حساس است. فناوری پرایمینگ بذر یک راهکار مدرن و کم‌هزینه برای مقابله با این چالش محسوب می‌شود. با وجود مطالعات متعدد، مقایسه همزمان کارایی منابع مختلف آهن (به‌ویژه نانوذرات) و کلسیم در تعدیل سمیت سرب در کینوا کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا این پژوهش با هدف ارزیابی و مقایسه اثر پرایمینگ با نانواهن، کلرید آهن و سولفات کلسیم بر شاخص‌های جوانه‌زنی، فعالیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و تجمع سرب در گیاهچه کینوا انجام شد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش فاکتوریل، بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، در سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه فناوری بذر دانشگاه خوزستان انجام شد. تیمارهای پرایمینگ شامل کلرید آهن و نانواهن در غلظت‌های ۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و سولفات کلسیم در غلظت‌های ۰، ۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌مولار بود. بذرها به مدت ۶ ساعت در محلول غوطه‌ور شدند. پس از پرایمینگ، بذرها در ژرمیناتور در معرض سطوح تنش نیترات سرب (۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) قرار گرفتند. جوانه‌زنی روزانه به مدت یک هفته پایش شد. پارامترهای مورفولوژیکی (طول ریشه‌چه و ساقه‌چه) با استفاده از نرم‌افزار دیجیمایزر اندازه‌گیری شدند. شاخص‌های استاندارد، درصد جوانه‌زنی (GP)، سرعت جوانه‌زنی (GR)، میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) و شاخص بنیه گیاهچه (SVI) محاسبه شدند. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز) به روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شدند. تجمع سرب در بافت‌ها پس از هضم اسیدی از طریق اسپکتروفتومتری جذب اتمی تعیین شد. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. روش اسلایس، اثرات متقابل را در سطوح مختلف تنش تجزیه و تحلیل کرد.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تمامی شاخص‌های مورد مطالعه تحت تأثیر معنی‌دار تنش سرب و تیمارهای پرایمینگ قرار گرفتند. افزایش غلظت نیترات سرب منجر به کاهش شدید درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر شد و متوسط زمان جوانه‌زنی را به طور معنی‌داری افزایش داد. در مقابل، تیمارهای پرایمینگ توانستند بخش عمده‌ای از این اثرات بازدارنده را خنثی کنند. بر اساس یافته‌های مقایسه میانگین، سولفات کلسیم در غلظت‌های ۱ تا ۲ میلی‌مولار برترین تیمار در بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بود؛ به طوری که حتی در بالاترین سطح تنش سرب، درصد جوانه‌زنی را در سطح ۹۳ درصد حفظ کرد. در بخش صفات مورفولوژیک، پرایمینگ با آهن کارایی بالاتری نشان داد. نانواهن در غلظت ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشترین تأثیر را در بهبود طول ساقه‌چه و ریشه‌چه در شرایط تنش ملایم و متوسط داشت، در حالی که در تنش شدید، کلرید آهن در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم عملکرد بهتری در حفظ بنیه گیاهچه نشان داد. بررسی‌های بیوشیمیایی نشان داد که با تشدید تنش سرب، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز به عنوان مکانیسم دفاعی افزایش یافت. تیمارهای پرایمینگ (به‌ویژه کلرید آهن ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و سولفات کلسیم ۲ میلی‌مولار) با تقویت این سیستم آنتی‌اکسیدانی، منجر به افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم‌ها نسبت به شاهد بدون پرایم شدند که این امر به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و پایداری بیشتر غشاهای سلولی کمک کرد. یافته مهم دیگر، تأثیر پرایمینگ بر محتوای فلز سنگین در گیاهچه بود؛ آنالیز جذب اتمی نشان داد که پرایمینگ با کلرید آهن ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تجمع سرب را در بافت‌های گیاهچه در بالاترین سطح تنش تا حدود ۴۸ درصد کاهش داد. این پدیده احتمالاً ناشی از رقابت یون‌های آهن با سرب در محل‌های جذب و بهبود پایداری غشا در بذرها پرایم شده است.

نتیجه‌گیری: این پژوهش تأیید کرد که اگرچه تنش سرب محدودیت جدی برای استقرار اولیه کینوا ایجاد می‌کند، پرایمینگ بذر با عناصر کلسیم و آهن راهکاری کارآمد برای تعدیل این سمیت است. سولفات کلسیم نه تنها از طریق یون کلسیم باعث بهبود فرآیندهای فیزیکی و آنزیمی اولیه می‌شود، بلکه بخش سولفات آن نیز با فراهم کردن بنیان گوگردی لازم برای تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، نقش موثری در تعدیل سمیت سرب ایفا کرده و سرعت و درصد جوانه‌زنی را تضمین می‌کند. در مقابل، پرایمینگ با آهن (به‌ویژه نانواهن در دوزهای پایین و کلرید آهن در دوزهای بالا) رشد گیاهچه و تقویت بنیه بذر را تحریک می‌کند. در این میان، کلرید آهن برتری محسوس در ارتقای فعالیت‌های آنزیمی (کاتالاز و پراکسیداز)، نشلن داد و کارایی چشم‌گیری در تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و جلوگیری از ورود بیش از حد سرب به بافت‌های گیاهی داشت. لذا استفاده از این تیمارها برای بهبود استقرار کینوا در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین پیشنهاد می‌گردد.

نویسنده مسئول:

علیرضا ابدالی مشهدی

ایمیل:

alirezaabdali@asnrukh.ac.ir

واژه‌های کلیدی: استقرار

گیاهچه، تنش اکسیداتیو، جذب

اتمی، فلزات سنگین، کاتالاز،

سمیت یون.

نحوه استناد:

جهانبخشی، ف.، ابدالی مشهدی،

ع.، موسوی، س. ا.، لطفی، ا.

(۱۴۰۵). ارزیابی پرایمینگ بذر بر

رفتار جوانه‌زنی گیاه کینوا

(*Chenopodium quinoa*)

(Willd.) و فعالیت‌های آنزیمی در

شرایط تنش نیترات سرب. مجله

پژوهش در متابولیت‌های گیاهی،

دوره ۴، شماره ۱، صفحات: ۶۳-

۸۳.

Doi:10.22034/jrpsm.2026.

583542.1115

مقدمه

در دهه‌های اخیر، آلودگی خاک به فلزات سنگین به یکی از چالش‌های جدی محیط زیست و کشاورزی تبدیل شده است (Najafi et al., 2015). این عناصر در طبیعت تجزیه نمی‌شوند و از طریق زنجیره غذایی به سطوح بالاتر منتقل می‌گردند. در نتیجه، حتی غلظت‌های پایین آن‌ها می‌تواند اثرات بلندمدتی بر حاصلخیزی خاک، ساختار میکروبی و رشد گیاهان داشته باشد (Andrade et al., 2023).

در میان فلزات سنگین، سرب یکی از فراگیرترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌ها محسوب می‌شود. سرب هیچ نقش زیستی ضروری در گیاهان ندارد و حضور آن حتی در غلظت‌های پایین، فرآیندهای مهم فیزیولوژیکی را مختل می‌کند. سرب با رقابت با عناصر ضروری، آسیب به غشاهای سلولی، کاهش جذب آب، مواد غذایی و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، باعث کاهش رشد و بروز تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود (Yang et al., 2011). همچنین سرب به دلیل حلالیت نسبی در آب، به راحتی توسط پوسته بذر و ریشه جذب شده و می‌تواند فرآیند جوانه‌زنی را از طریق اختلال در جذب آب و مهار تحرک نشاسته در آندوسپرم مختل کند (Taie et al., 2017; Venkatachalam et al., 2019).

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) به عنوان یک شبه‌غله با ارزش غذایی بالا و تحمل نسبی به شوری، خشکی و دماهای نامساعد، طی سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را در برنامه‌های کشاورزی و امنیت غذایی به خود جلب کرده است (Mahdi et al., 2021). با این حال، آلودگی خاک به فلزات سنگین همچنان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان است و حتی گیاهان مقاومی مانند کینوا نیز در مواجهه با غلظت‌های بالای سرب دچار اختلالات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی می‌شوند (Naik et al., 2022; Alharby et al., 2020). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که سرب باعث کاهش طول ریشه و ساقه، اختلال در فتوسنتز، افزایش تنش اکسیداتیو و کاهش جوانه‌زنی در کینوا می‌شود (Hashemi Shahraki, 2025; Iftikhar et al., 2022; Aygun et al., 2022; Bamagoos et al., 2022).

در سال‌های اخیر، استفاده از روش پرایمینگ بذر به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود تحمل گیاهان در برابر تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته است. پرایمینگ با عناصر معدنی، از جمله آهن و کلسیم، می‌تواند موجب بهبود جوانه‌زنی، رشد اولیه، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش ورود فلزات سنگین به بافت‌های حساس گردد (Gupta et al., 2022). آهن، به‌ویژه در قالب نانوذرات یا به صورت نمک‌های محلول مانند کلرید آهن، نقش مهمی در فرآیندهای متابولیک گیاه، سنتز کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های

آنتی‌اکسیدانی دارد (Gomez et al., 2021). همچنین کلسیم به عنوان یک عنصر ساختمانی و پیام‌رسان سلولی، در تثبیت غشاهای، تنظیم پاسخ‌های دفاعی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از فلزات سنگین نقش اساسی ایفا می‌کند (Karim et al., 2020). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که پرایمینگ با نانواهن و سولفات آهن باعث بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در محصولات مانند گندم، ذرت، عدس و نخود تحت تنش‌های مختلف شده است (Vahdani Mazhar et al., 2023; Shah et al., 2023; Rashvanlouei et al., 2023; Rizwan et al., 2019). همچنین پرایمینگ با کلرید کلسیم قدرت جوانه‌زنی بادام زمینی (*Arachis hypogaea* L.) را افزایش داده است (Nourhosseini et al., 2016). با وجود این، تاکنون مطالعه‌ای که به طور همزمان اثر پرایمینگ با نانواهن، کلرید آهن و سولفات کلسیم را بر تحمل کینوا به سمیت نیترات سرب مقایسه کرده باشد، انجام نشده است. از این رو، هدف این پژوهش بررسی تأثیر تیمارهای پرایمینگ بر شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه گیاهچه، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع سرب در گیاهچه کینوا تحت سطوح مختلف تنش نیترات سرب بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام گرفت. بذرهای کینوا (رقم تی تی کاکا) از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. بذرهای ابتدا با هیپوکلریت سدیم ۱٪ به مدت ۲ دقیقه ضدعفونی و سپس با آب مقطر سه بار شستشو شدند. پرایمینگ بذر در دو بخش انجام گرفت: بخش نخست شامل پرایمینگ با کلرید آهن (FeCl_3) و نانوذرات آهن (nano-Fe) در غلظت‌های ۰، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (به مدت ۶ ساعت) و بخش دوم شامل پرایمینگ با سولفات کلسیم (CaSO_4) در غلظت‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌مولار (به مدت ۶ ساعت) بود. در این آزمایش، بذرهای شاهد به صورت خشک و بدون هیچ‌گونه پیش‌تیمار یا خیساندن (بدون پرایمینگ) استفاده شدند. پس از اتمام پرایمینگ، بذرهای روی کاغذ صافی در سایه و در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. آزمایش به صورت فاکتوریل (دو عامل) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. در هر تکرار، ۲۵ بذر از هر تیمار در پتری دیش‌های ۹۰ میلی‌متری حاوی یک لایه کاغذ صافی کشت شدند. به هر پتری دیش ۵ میلی‌لیتر از محلول نیترات سرب (II) با غلظت‌های ۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اضافه شد. پتری‌ها در ژرمیناتور با دمای ثابت 25 ± 1 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰٪ به مدت ۷ روز قرار گرفتند. جوانه‌زنی به صورت روزانه ثبت شد و معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به طول ۲ میلی‌متر بود (Miller & Chapman, 1978). در پایان روز هفتم، از هر پتری ۱۰ گیاهچه به

بذر و تولنایی بهتر برای استقرار گیاهچه است. برای اندازه‌گیری فعالیت کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD)، نمونه‌های گیاهچه (۵۰ میلی‌گرم) در نیتروژن مایع هموژن شده و در بافر فسفات (۵۰ میلی‌مولار، pH=7) حل شدند. پس از سانتریفیوژ (۱۵ دقیقه، $g \times 10000$ ، ۴ درجه سلسیوس)، سوپرناتانت برای سنجش استفاده شد. فعالیت کاتالاز با اندازه‌گیری کاهش جذب در ۲۴۰ نانومتر (ضریب خاموشی $0.394 \text{ cm}^{-1} \text{ mM}^{-1}$) طی یک دقیقه تعیین شد (Dhindsa *et al.*, 1981) و فعالیت پراکسیداز با اندازه‌گیری افزایش جذب در ۴۷۰ نانومتر ناشی از اکسیداسیون گایاکول به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Lamda EZ 201) انجام شد (Palve *et al.*, 2020). به منظور تعیین میزان تجمع سرب در گیاهچه‌ها، پس از ارزیابی شاخص‌های جوانه‌زنی و بنیه بذر، تیمار برتر پرایمینگ انتخاب شد. بر این اساس، تیمار کلرید آهن با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم که بیشترین بنیه بذر را نشان داد، برای اندازه‌گیری محتوای سرب در گیاهچه‌ها انتخاب گردید. بنابراین اندازه‌گیری محتوای سرب تنها در دو سطح پرایمینگ شامل بذرهای بدون پرایمینگ (شاهد) و بذرهای پرایم شده با کلرید آهن (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطوح مختلف نیترات سرب انجام شد. برای اندازه‌گیری غلظت سرب در بافت، ابتدا با آب مقطر شستشو داده شده و سپس در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک گردیدند. نمونه‌های خشک شده با استفاده از روش هضم اسیدی آماده شدند. به این منظور، ۰/۵ گرم از پودر خشک گیاهچه در ارلن مایر به مخلوط اسید نیتریک (HNO_3) و پرکلریک اسید (HClO_4) با نسبت حجمی ۳:۱ اضافه گردید. نمونه‌ها روی صفحه داغ (هات پلیت) تا زمانی که محلول شفاف شد (حدود ۲-۳ ساعت) حرارت داده شدند. پس از سرد شدن، عصاره حاصل با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده و از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شد. غلظت سرب در عصاره‌های حاصل با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) با شعله (فلیم) در طول موج ۲۸۳/۳ نانومتر اندازه‌گیری گردید. نتایج بر حسب میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم وزن خشک گیاهچه (mg Pb) گزارش شد (Sakabria *et al.*, 2011). پیش از تجزیه واریانس، نرمالیتی داده‌ها (آزمون شاپیرو-ویلک) و همگنی واریانس‌ها (آزمون لون) تأیید شد. تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. مقایسه میانگین اثرات اصلی به روش LSD در سطح ۵ درصد انجام گردید. در صورت معنی‌دار شدن اثر متقابل، اثرات ساده با رویه برش‌دهی فیزیکی (Slice) در SAS بررسی شدند.

نتایج و بحث

برهم‌کنش تنش سرب و پرایمینگ بر صفات درصد جوانه‌زنی نهایی، سرعت جوانه‌زنی و ضریب سرعت جوانه‌زنی در سطح احتمال

طور تصادفی انتخاب شد. طول ریشه‌چه و ساقه‌چه با استفاده از نرم‌افزار Digimizer (نسخه ۶) اندازه‌گیری شد. شاخص‌های جوانه‌زنی بر طبق روابط زیر محاسبه گردید:

$$\text{رابطه ۱: درصد جوانه‌زنی نهایی (FGP) (Ikic et al., 2012)} \\ \text{FGP} = (\text{Ng} / \text{Nt}) \times 100$$

Ng: تعداد بذر جوانه‌زده و Nt: تعداد بذر کشت شده می‌باشند.

$$\text{رابطه ۲: شاخص جوانه‌زنی (GI) (Arnold et al., 1991)} \\ \text{GI} = (7 \times \text{n}_1) + (6 \times \text{n}_2) + (5 \times \text{n}_3) + (4 \times \text{n}_4) + (3 \times \text{n}_5) + (2 \times \text{n}_6) + (1 \times \text{n}_7)$$

Ni: آخرین روزی که تمام بذر جوانه زدند و gn: تعداد بذر جوانه زده در همان روز است.

رابطه ۳: متوسط زمان جوانه‌زنی (MGT) بر اساس رابطه اورچارد (Orchard, 1977) محاسبه گردید:

$$\text{MGT} = \Sigma(n \times d) / \Sigma n$$

که در آن، n = تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر روز، d = تعداد روزهای سپری شده از شروع آزمایش و Σn = کل بذرهای جوانه‌زده در پایان آزمایش می‌باشد. واحد MGT بر حسب روز گزارش می‌شود. مقادیر کمتر MGT نشان‌دهنده سرعت جوانه‌زنی بیشتر و یکنواختی بهتر است.

رابطه ۴: سرعت جوانه‌زنی (GR) با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (Bajji *et al.*, 2002):

$$\text{GR} = \Sigma \text{Ni} / \text{Ti}$$

Ni = تعداد بذر جوانه‌زده در هر روز، Ti = تعداد روزهای سپری شده از شروع آزمایش

رابطه ۵: ضریب سرعت جوانه‌زنی (CVG) (Jones and Sanders, 1987):

$$\text{CVG} = \frac{\text{G1} + \text{G2} + \text{G3} + \text{G4} + \text{G5} + \text{G6} + \text{G7}}{(1 \times \text{G1}) + (2 \times \text{G2}) + (3 \times \text{G3}) + (4 \times \text{G4}) + (5 \times \text{G5}) + (6 \times \text{G6}) + (7 \times \text{G7})}$$

G1-G7: تعداد بذر جوانه‌زده از روز اول تا روز هفتم را نشان می‌دهد. رابطه ۶: شاخص سرعت جوانه‌زنی (GRI) (Esechie, 1994):

$$\text{GRI} = \frac{\text{G1}}{1} + \frac{\text{G2}}{2} + \frac{\text{G3}}{3} + \frac{\text{G4}}{4} + \frac{\text{G5}}{5} + \frac{\text{G6}}{6} + \frac{\text{G7}}{7}$$

که G1، G2 و G9 به ترتیب تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز اول، دوم و روز ۷ هفتم هستند.

رابطه ۷: شاخص بنیه بذر (Seed Vigor Index). شاخص بنیه بذر بر اساس روش عبدالباقی و اندرسون (Abdul-Baki & Anderson, 1973) محاسبه گردید. برای این منظور، از رابطه زیر استفاده شد:

$$\text{VI} = (\text{SL} + \text{RL}) \times \text{GP} / 100$$

که در آن، VI = شاخص بنیه بذر (بدون واحد)، SL = میانگین طول ساقه‌چه (سانتی‌متر)، RL = میانگین طول ریشه‌چه (سانتی‌متر) و GP = درصد جوانه‌زنی نهایی (درصد) می‌باشد. لازم به ذکر است که در برخی منابع، از مجموع طول ساقه‌چه و ریشه‌چه (یا حاصلضرب آن‌ها) استفاده می‌شود. در این پژوهش از مجموع طول ساقه‌چه و ریشه‌چه بهره گرفته شد. مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر بنیه بیشتر

میلی گرم بر لیتر) باعث کاهش شدید جوانه زنی شدند. در پژوهش حاضر نیز کاهش در درصد جوانه زنی با افزایش غلظت نیترات سرب مشاهده شد، به طوری که در بالاترین سطح تنش (۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) جوانه زنی نسبت به شاهد کاهش معنی داری نشان داد (جدول ۲). پرایمینگ بذر به عنوان یک محرک رشد مؤثر، با کاهش نشت یون از سلول‌ها، محدود کردن تجمع یون‌های سمی، بهبود پایداری غشاهای سلولی و تنظیم پتانسیل اسمزی، میزان تجمع فلزات سنگین را کاهش داده و تحمل گیاه به تنش را بهبود می‌بخشد (Jini & Joseph, 2017; Nouri *et al.*, 2021). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پرایمینگ با ترکیبات حاوی کلسیم و آهن می‌تواند اثرات منفی فلزات سنگین بر جوانه زنی را کاهش دهد. به عنوان مثال، کاربرد کلرید کلسیم باعث بهبود معنی دار شاخص‌های جوانه زنی در کلزا شد (Gupta *et al.*, 2022). Zhou *et al.* (2021) نیز گزارش کردند که تنش ۲۰ میلی مولار سرب باعث کاهش ۷۳ درصدی جوانه زنی شد، در حالی که پرایمینگ با نانوذرات روی و آهن (۲۰۰ میلی گرم بر لیتر) به ترتیب جوانه زنی را ۳۵ و ۵۵ درصد افزایش داد. همچنین Vahdani Rashvanlouei *et al.* (2023) نشان دادند که کاربرد سولفات آهن در عدس، به ویژه در غلظت ۶۰ میلی مولار، اغلب شاخص‌های جوانه زنی را بهبود بخشید.

شاخص جوانه زنی: نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی (جدول ۳) نشان داد که پرایمینگ بذر به طور معنی داری باعث افزایش شاخص جوانه زنی کینوا نسبت به تیمار عدم پرایمینگ شد، اگرچه بین تیمار عدم پرایمینگ و غلظت‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید آهن تفاوت آماری معنی داری مشاهده نشد. بالاترین مقدار شاخص جوانه زنی (۳۳۰) در تیمار سولفات کلسیم با غلظت ۲ میلی مولار ثبت گردید که با غلظت‌های ۱ و ۱/۵ میلی مولار سولفات کلسیم تفاوت معنی داری نداشت و در یک کلاس آماری قرار گرفتند (جدول ۳). همچنین، افزایش غلظت نیترات سرب باعث کاهش معنی دار شاخص جوانه زنی شد. به طوری که غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب نسبت به شاهد (عدم کاربرد نیترات سرب) کاهش ۱۰/۴ درصدی این شاخص را به همراه داشت. با این حال، بین سطوح ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب تفاوت آماری معنی داری مشاهده نشد (جدول ۳). شاخص جوانه زنی معیاری از سرعت و یکنواختی جوانه زنی است و مقادیر بالاتر آن بیانگر جوانه زنی سریع‌تر و یکنواخت‌تر می‌باشد (Afzal *et al.*, 2005). کاهش این شاخص در اثر فلزات سنگین توسط پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است (Parmoon *et al.*, 2014). وجود فلزات سنگین در محیط جوانه زنی با نفوذ سریع به داخل بذر، فرآیندهای فیزیولوژیکی کلیدی مانند تنفس را مختل کرده و منجر به اختلال در تقسیم سلولی و رشد گیاهچه می‌شود.

۵ درصد، و بر شاخص بنیه بذر، طول ساقه‌چه، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۱). همچنین، اثرات اصلی تنش سرب و پرایمینگ بر متوسط زمان جوانه زنی، شاخص سرعت جوانه زنی، شاخص جوانه زنی و طول ریشه‌چه در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بودند (جدول ۱).

درصد جوانه زنی نهایی: نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که افزایش غلظت نیترات سرب موجب کاهش درصد جوانه زنی شد، اگرچه شدت این کاهش به نوع و غلظت پرایمینگ وابسته بود (جدول ۲). در شرایط عدم تنش (شاهد) و تنش خفیف (۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب)، تیمارهای نانواهن (۸ میلی گرم بر کیلوگرم) و سولفات کلسیم (۱، ۱/۵ و ۲ میلی مولار) بیشترین افزایش را در درصد جوانه زنی نسبت به شاهد (بدون پرایمینگ) و سایر تیمارها نشان دادند. در سطوح تنش متوسط تا شدید (۴۰ و ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، بهترین عملکرد مربوط به غلظت‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی مولار سولفات کلسیم بود. در بالاترین سطح تنش (۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب)، بالاترین درصد جوانه زنی در تیمار ۲ میلی مولار سولفات کلسیم با میانگین ۹۳/۳ درصد مشاهده شد (جدول ۲).

جوانه زنی حساس‌ترین مرحله چرخه زندگی گیاهان به تنش‌های محیطی محسوب می‌شود و تنش‌ها می‌توانند با کند کردن یا کاهش جوانه زنی، استقرار گیاهچه را با اختلال مواجه کنند (Borsani *et al.*, 2001). قرار گرفتن در معرض سرب، حتی در غلظت‌های پایین، موجب اختلال در جوانه زنی و کاهش سرعت رشد می‌شود (Khan *et al.*, 2015). در مراحل اولیه جوانه زنی، پوسته بذر مانع ورود یون‌های سرب می‌شود، اما با پیشرفت جوانه زنی و افزایش نفوذپذیری پوشش بذر، سرب به بافت‌های داخلی به ویژه رویان نفوذ کرده و با اختلال در فعالیت‌های متابولیکی و فیزیولوژیکی، روند جوانه زنی را کند کرده و تأخیر در ظهور گیاهچه را سبب می‌شود (Park *et al.*, 2013). افزایش غلظت فلزات سنگین، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را در سلول‌ها تحریک کرده و فرآیند پراکسیداسیون لیپیدهای غشا را تشدید می‌کند که با افزایش تجمع مالون‌دی‌آلدئید همراه است. این تنش اکسیداتیو، عملکرد طبیعی غشاهای سلولی را مختل کرده، نفوذپذیری انتخابی را کاهش داده و نشت ترکیبات ذخیره‌ای از بذر را افزایش می‌دهد که در نهایت به کاهش توان جوانه زنی منجر می‌شود (Khanna *et al.*, 2018). همچنین تأخیر در جوانه زنی می‌تواند ناشی از تداخل سرب با فعالیت آنزیم‌های پروتئاز و آمیلاز باشد (Motuzova *et al.*, 2014).

Parmoon *et al.* (2014) گزارش کردند که نیترات کادمیوم، نیترات سرب و نیترات بیسموت در غلظت‌های پایین تأثیری بر درصد جوانه زنی ذرت نداشتند، اما در غلظت‌های بالا (۳۵۰ و ۵۰۰

جدول ۱. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش سرب و پرایمینگ بر صفات اندازه‌گیری شده کینوا.
Table 1. Results of variance analysis (mean squares) for the effects of lead stress and priming on measured traits of quinoa.

منابع تغییرات S. O. V	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	شاخص جوانه‌زنی Germination index	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	شاخص سرعت جوانه‌زنی Germination rate index	ضریب سرعت جوانه‌زنی Coefficient of Velocity of Germination	متوسط زمان جوانه‌زنی Mean germination time	طول ریشه‌چه Root length	طول ساقه‌چه Shoot length	شاخص بنیه گیاهچه Seedling vigor index	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase Enzyme Activity	فعالیت آنزیم پراکسیداز Peroxidase Enzyme Activity
پرایمینگ (A) Priming (A)	12	534**	12357**	0.288**	179**	0.288**	3.21**	206**	414**	373**	0.009**	2.32**
سرب (B) Lead (B)	4	497**	6603**	0.036**	41.6**	0.036**	0.40**	7707**	4719**	23534**	0.008**	0.78**
اثر متقابل A×B Interaction A×B	48	97.9*	960 ^{ns}	0.011*	4.38 ^{ns}	0.011*	0.14 ^{ns}	59.3 ^{ns}	69.2**	178**	0.27**	21.8**
خطا Error	130	61.2	733	0.007	5.29	0.007	0.11	45.6	20.2	98.6	0.01	4.63
ضریب تغییرات (درصد) C. V (%)		9.1	9.7	15.7	14.5	15.7	16.2	21.05	11.15	15.09	7.51	11.7

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪ را نشان می‌دهد.
^{ns}، * and ** represent not significant and significant at 5% and 1% probability, respectively.

جدول ۲- مقایسه میانگین برهم کنش پرایمینگ و نیترات سرب برای درصد جوانه زنی، سرعت جوانه زنی و ضریب سرعت جوانه زنی در کینوا

Table 2 - Comparison of the mean interaction between priming and lead nitrate for germination percentage, Germination rate and Coefficient of Velocity of Germination in quinoa

پرایمینگ	درصد جوانه زنی نهایی (درصد) Germination (%)					سرعت جوانه زنی (بذر در روز) Germination rate (seed Day ⁻¹)					ضریب سرعت جوانه زنی Coefficient of Velocity of Germination				
	نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg ⁻¹)					نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg ⁻¹)					نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg ⁻¹)				
	Zero	20	40	80	100	Zero	20	40	80	100	Zero	20	40	80	100
پرایمینگ شاهد	85.3 ^c	78.7 ^c	74.7 ^d	73.3 ^c	69.3 ^c	0.40 ^e	0.38 ^f	0.37 ^e	0.37 ^d	0.32 ^e	4.0 ^f	3.8 ^e	3.7 ^e	3.7 ^e	3.2 ^e
کلرید آهن ۱ Iron Chloride 4 mg/kg	93.3 ^{bc}	86.7 ^{cd}	82.7 ^{cd}	81.3 ^{cd}	77.3 ^c	0.54 ^{cd}	0.67 ^{cd}	0.62 ^{bc}	0.49 ^{bc}	0.44 ^{cd}	6.7 ^{cd}	6.2 ^{bc}	4.9 ^{cd}	5.4 ^{cd}	4.4 ^{cd}
کلرید آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 6 mg/kg	93.3 ^{bc}	89.3 ^{cd}	80.0 ^{cd}	76.0 ^{de}	74.7 ^d	0.50 ^{cd}	0.44 ^{ef}	0.39 ^e	0.39 ^d	0.37 ^e	5.5 ^{de}	4.4 ^{de}	3.7 ^e	3.9 ^e	3.9 ^{de}
کلرید آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 8 mg/kg	88.0 ^c	81.3 ^{de}	80.0 ^{cd}	76.0 ^{de}	76.0 ^{cd}	0.46 ^{de}	0.45 ^e	0.42 ^e	0.38 ^d	0.40 ^{de}	4.6 ^{ef}	4.5 ^{de}	4.2 ^{de}	4.0 ^{de}	3.8 ^{de}
کلرید آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 10 mg/kg	86.7 ^c	80.0 ^{de}	80.0 ^{cd}	78.7 ^d	73.3 ^d	0.53 ^{cd}	0.44 ^{ef}	0.47 ^{de}	0.41 ^{cd}	0.41 ^{de}	5.3 ^{de}	4.7 ^{de}	4.4 ^{de}	4.1 ^{de}	4.1 ^{de}
نانو آهن ۴ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 4 mg/kg	86.7 ^c	90.7 ^{bc}	88.0 ^{bc}	78.7 ^d	77.3 ^c	0.48 ^{de}	0.56 ^e	0.47 ^{de}	0.42 ^{cd}	0.38 ^e	4.8 ^{ef}	4.7 ^{de}	4.6 ^{cd}	4.2 ^{de}	3.8 ^{de}
نانو آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 6 mg/kg	88.0 ^c	92.0 ^{bc}	85.3 ^{bc}	73.3 ^c	77.3 ^c	0.47 ^{de}	0.59 ^d	0.56 ^{cd}	0.43 ^{cd}	0.43 ^{cd}	5.9 ^{de}	5.6 ^{cd}	4.7 ^{cd}	4.3 ^{de}	4.3 ^{de}
نانو آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 8 mg/kg	98.7 ^a	98.7 ^a	89.3 ^{bc}	82.0 ^{cd}	73.3 ^d	0.55 ^{cd}	0.51 ^d	0.52 ^{cd}	0.50 ^{bc}	0.49 ^{cd}	5.5 ^{de}	5.2 ^{cd}	5.1 ^c	5.0 ^{cd}	4.9 ^{cd}
نانو آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 10 mg/kg	93.3 ^{bc}	84.0 ^d	82.7 ^{cd}	84.0 ^{bc}	70.7 ^{de}	0.54 ^{cd}	0.50 ^{de}	0.49 ^{de}	0.44 ^{cd}	0.45 ^{cd}	5.4 ^{de}	5.0 ^{cd}	4.9 ^{cd}	4.4 ^{de}	4.5 ^{cd}
سولفات کلسیم ۰/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 0.5 mM	89.3 ^c	93.3 ^{bc}	84.0 ^{bc}	86.7 ^{bc}	77.3 ^c	0.71 ^{bc}	0.81 ^{ab}	0.63 ^{bc}	0.69 ^{ab}	0.55 ^{bc}	7.1 ^{bc}	8.1 ^a	6.9 ^b	6.3 ^{bc}	5.5 ^{bc}
سولفات کلسیم ۱ میلی مولار Calcium Sulfate 1 mM	96.0 ^{ab}	97.3 ^a	98.7 ^a	92.0 ^{ab}	88.0 ^b	0.77 ^{ab}	0.77 ^{bc}	0.76 ^{ab}	0.74 ^a	0.51 ^{bc}	7.7 ^b	7.7 ^{ab}	7.6 ^{ab}	7.4 ^a	5.1 ^{cd}
سولفات کلسیم ۱/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 1.5 mM	97.3 ^a	94.7 ^{ab}	93.3 ^{ab}	94.7 ^{ab}	86.7 ^b	0.75 ^{bc}	0.82 ^{ab}	0.77 ^{ab}	0.69 ^{ab}	0.67 ^{ab}	7.5 ^{bc}	8.2 ^a	7.7 ^{ab}	6.9 ^{ab}	6.7 ^{ab}
سولفات کلسیم ۲ میلی مولار Calcium Sulfate 2 mM	97.3 ^a	97.3 ^a	98.7 ^a	96.0 ^a	93.3 ^a	0.81 ^a	0.89 ^a	0.80 ^a	0.72 ^a	0.71 ^a	8.9 ^a	8.1 ^a	8.0 ^a	7.2 ^a	7.1 ^a

مقایسه میانگین با استفاده از رویه L.S. Means انجام شده و در هر سطح نیترات سرب، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

Means comparison was done using L. S. Means procedure at each level of lead nitrate; means with at least one common letter are not significantly different.

افزون بر این، افزایش غلظت فلزات سنگین باعث تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدها شده و به غشای سلولی آسیب می‌زند. در نتیجه نفوذپذیری انتخابی غشا کاهش یافته و نشست مواد ذخیره‌ای بذر افزایش می‌یابد که کاهش شاخص جوله‌زنی را به دنبال دارد (Khanna *et al.*, 2018). پرایمینگ بذر با فراهم کردن فرصت کافی برای جذب آب، فعال‌سازی آنزیم‌ها و ترمیم آسیب‌های سلولی پیش از کاشت، موجب تسریع جوله‌زنی و افزایش شاخص جوله‌زنی می‌شود (Afzal *et al.*, 2005). استفاده از ترکیبات معدنی مناسب در فرآیند پرایمینگ با بهبود تعادل عناصر غذایی و افزایش کارایی سیستم دفاعی بذر، تحمل به تنش فلزات سنگین را افزایش می‌دهد (Jini and Joseph, 2017). عناصری مانند کلسیم و آهن با تثبیت غشای سلولی، تنظیم فعالیت آنزیمی و بهبود فرآیندهای تنفسی، سرعت و یکنواختی جوله‌زنی را افزایش می‌دهند (Nouri *et al.*, 2021). در این پژوهش، تیمار سولفات کلسیم بیشترین تأثیر را بر شاخص جوله‌زنی نشان داد که می‌تواند به دلیل اثر مثبت کلسیم بر پایداری غشا، کاهش ورود فلزات سنگین به سلول و فعال‌سازی آنزیم‌های مرتبط با جوله‌زنی باشد (Zhou *et al.*, 2021). همچنین نانواهن در مقایسه با کلرید آهن تأثیر بهتری بر بهبود شاخص جوله‌زنی داشت. این برتری احتمالاً به دلیل آزادسازی تدریجی و کنترل‌شده یون‌های Fe در نانوذرات است که از بروز سمیت یونی و تنش اکسیداتیو جلوگیری می‌کند، در حالی که کلرید آهن با آزادسازی سریع یون‌های Fe و Cl باعث افزایش شوری و تولید گونه‌های فعال اکسیژن شده و فرآیند جوله‌زنی را مختل می‌کند (Roosta *et al.*, 2015). در مجموع، انتخاب صحیح ترکیب پرایمینگ می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش استقرار اولیه گیاه و کاهش اثرات منفی تنش فلزات سنگین باشد.

سرعت جوله‌زنی: نتایج مقایسه میانگین سطوح پرایمینگ در هر سطح نیتрат سرب (جدول ۲) نشان داد که افزایش غلظت نیترات سرب به‌طور معنی‌داری باعث کاهش سرعت جوله‌زنی کینوا شد. پرایمینگ بذر توانست اثرات منفی تنش را کاهش داده و سرعت جوله‌زنی را بهبود بخشد. در تمامی سطوح نیترات سرب (از صفر تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، تیمار سولفات کلسیم بالاترین سرعت جوله‌زنی را به خود اختصاص داد و در این میان، غلظت ۲ میلی‌مولار بیشترین اثر بهبود دهنده را نشان داد. همچنین، کاربرد نانواهن در مقایسه با کلرید آهن تأثیر بهتری بر افزایش سرعت جوله‌زنی داشت (جدول ۲). افزایش غلظت نیترات سرب باعث کاهش محسوس سرعت جوله‌زنی شد که با گزارش‌های پیشین درباره اثرات بازدارنده فلزات سنگین بر جوله‌زنی همخوانی دارد. سرب از طریق ایجاد اختلال در تنفس سلولی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و تخریب ساختار غشاء، باعث کندی آغاز رشد ریشه‌چه و کاهش سرعت جوله‌زنی می‌شود (Park *et al.*, 2013). به‌طور کلی، تنش سرب و سایر فلزات سنگین موجب کاهش شاخص‌های جوله‌زنی، به‌ویژه سرعت جوله‌زنی می‌گردد (Rahman Khan and Mahmud Khan, 2011). Parmoon *et al.* (2014) نیز گزارش کردند که تیمار با نیترات کادمیوم، نیترات سرب و نیترات بیسموت باعث کاهش سرعت جوله‌زنی در ذرت شد. در پژوهش حاضر نیز تیمار ۲ میلی‌مولار سولفات کلسیم تحت تنش ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب سرعت جوله‌زنی را ۱۲۲ درصد نسبت به شاهد تنش‌دیده افزایش داد. کاهش شدید سرعت جوله‌زنی در غلظت‌های بالای نیترات سرب (به‌ویژه ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده گردید. افزون بر این، تنش‌های محیطی می‌توانند با محدود کردن آب در دسترس بذر، خروج ریشه‌چه را به تأخیر انداخته و در نتیجه سرعت جوله‌زنی را کاهش دهند (Ansari *et al.*, 2016)؛ بنابراین، کاهش سرعت جوله‌زنی کینوا تحت تنش سرب، بیش از آنکه ناشی از محدودیت جذب آب باشد، پیامد مستقیم سمیت سلولی و اختلال در فعالیت‌های متابولیک بذر است. یون‌های سرب با تمایل بالا به گروه‌های سولفیدریل در ساختار پروتئین‌ها، منجر به غیرفعال شدن آنزیم‌های کلیدی جوله‌زنی به‌ویژه آلفا-آمیلاز می‌شوند. اختلال در این آنزیم باعث توقف هیدرولیز ذخایر نشاسته و عدم تأمین انرژی لازم برای رشد جنین می‌گردد. علاوه بر این، سرب با القای تولید بیش از حد گونه‌های اکسیژن فعال و ایجاد تنش اکسیداتیو، باعث پراکسیداسیون لیپیدهای غشا و تخریب یکپارچگی سلولی می‌شود. این گسیختگی در سیستم آنزیمی و ساختاری، فرآیند خروج ریشه‌چه را به تأخیر انداخته و در نهایت منجر به کاهش معنادار سرعت جوله‌زنی می‌گردد. با وجود اثرات منفی تنش سرب، یافته‌های این پژوهش نشان داد که پرایمینگ بذر به‌طور قابل توجهی از شدت این اثرات کاسته و شرایط مناسب‌تری برای شروع جوله‌زنی فراهم کرده است (جدول ۲). در میان تیمارهای پرایمینگ، سولفات کلسیم در تمامی سطوح نیترات سرب (حتی در شرایط بدون تنش) بهترین عملکرد را داشت و غلظت ۲ میلی‌مولار آن بیشترین نقش بهبوددهنده را ایفا کرد. این برتری احتمالاً ناشی از نقش کلیدی کلسیم در تثبیت غشای سلولی، کاهش نفوذ یون‌های سرب به درون سلول، و فعال‌سازی آنزیم‌های وابسته به آغاز جوله‌زنی است (Zhou *et al.*, 2021). Li *et al.* (2015) نیز نشان دادند که کاربرد کلسیم در شرایط تنش کادمیوم با افزایش جذب عناصر غذایی ضروری و کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید (شاخص پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء)، باعث بهبود سرعت جوله‌زنی می‌شود.

افزون بر این، افزایش غلظت فلزات سنگین باعث تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدها شده و به غشای سلولی آسیب می‌زند. در نتیجه نفوذپذیری انتخابی غشا کاهش یافته و نشست مواد ذخیره‌ای بذر افزایش می‌یابد که کاهش شاخص جوله‌زنی را به دنبال دارد (Khanna *et al.*, 2018). پرایمینگ بذر با فراهم کردن فرصت کافی برای جذب آب، فعال‌سازی آنزیم‌ها و ترمیم آسیب‌های سلولی پیش از کاشت، موجب تسریع جوله‌زنی و افزایش شاخص جوله‌زنی می‌شود (Afzal *et al.*, 2005). استفاده از ترکیبات معدنی مناسب در فرآیند پرایمینگ با بهبود تعادل عناصر غذایی و افزایش کارایی سیستم دفاعی بذر، تحمل به تنش فلزات سنگین را افزایش می‌دهد (Jini and Joseph, 2017). عناصری مانند کلسیم و آهن با تثبیت غشای سلولی، تنظیم فعالیت آنزیمی و بهبود فرآیندهای تنفسی، سرعت و یکنواختی جوله‌زنی را افزایش می‌دهند (Nouri *et al.*, 2021). در این پژوهش، تیمار سولفات کلسیم بیشترین تأثیر را بر شاخص جوله‌زنی نشان داد که می‌تواند به دلیل اثر مثبت کلسیم بر پایداری غشا، کاهش ورود فلزات سنگین به سلول و فعال‌سازی آنزیم‌های مرتبط با جوله‌زنی باشد (Zhou *et al.*, 2021). همچنین نانواهن در مقایسه با کلرید آهن تأثیر بهتری بر بهبود شاخص جوله‌زنی داشت. این برتری احتمالاً به دلیل آزادسازی تدریجی و کنترل‌شده یون‌های Fe در نانوذرات است که از بروز سمیت یونی و تنش اکسیداتیو جلوگیری می‌کند، در حالی که کلرید آهن با آزادسازی سریع یون‌های Fe و Cl باعث افزایش شوری و تولید گونه‌های فعال اکسیژن شده و فرآیند جوله‌زنی را مختل می‌کند (Roosta *et al.*, 2015). در مجموع، انتخاب صحیح ترکیب پرایمینگ می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش استقرار اولیه گیاه و کاهش اثرات منفی تنش فلزات سنگین باشد.

سرعت جوله‌زنی: نتایج مقایسه میانگین سطوح پرایمینگ در هر سطح نیترات سرب (جدول ۲) نشان داد که افزایش غلظت نیترات سرب به‌طور معنی‌داری باعث کاهش سرعت جوله‌زنی کینوا شد. پرایمینگ بذر توانست اثرات منفی تنش را کاهش داده و سرعت جوله‌زنی را بهبود بخشد. در تمامی سطوح نیترات سرب (از صفر تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، تیمار سولفات کلسیم بالاترین سرعت جوله‌زنی را به خود اختصاص داد و در این میان، غلظت ۲ میلی‌مولار بیشترین اثر بهبود دهنده را نشان داد. همچنین، کاربرد نانواهن در مقایسه با کلرید آهن تأثیر بهتری بر افزایش سرعت جوله‌زنی داشت (جدول ۲). افزایش غلظت نیترات سرب باعث کاهش محسوس سرعت جوله‌زنی شد که با گزارش‌های پیشین درباره اثرات بازدارنده فلزات سنگین بر جوله‌زنی همخوانی دارد. سرب از طریق ایجاد

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی پرایمینگ و نیترات سرب برای شاخص جوانه زنی، شاخص سرعت جوانه زنی، متوسط زمان جوانه زنی و طول ریشه چه در کینوا

Table 3 - comparison of the mean effects of priming and lead nitrate for Germination index, Germination rate index, Mean germination time and Root length in quinoa

عامل‌های آزمایش Experimental Treatments	شاخص جوانه زنی Germination index	شاخص سرعت جوانه زنی Germination rate index	متوسط زمان جوانه زنی (روز) Mean germination time (day)	طول ریشه چه (میلی متر) Root length (mm)
پرایمینگ Priming				
Control شاهد	237 ^c	11.4 ^c	2.78 ^a	27.7 ^{cd}
کلرید آهن ۴ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 4 mg/kg	249 ^{de}	15.0 ^{bc}	1.89 ^{cd}	32.5 ^{ab}
کلرید آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 6 mg/kg	252 ^{de}	13.2 ^{de}	2.45 ^{ab}	37.8 ^a
کلرید آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 8 mg/kg	266 ^{cd}	13.2 ^{de}	2.41 ^{ab}	37.2 ^a
کلرید آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 10 mg/kg	268 ^{cd}	14.3 ^{cd}	2.26 ^{bc}	37.3 ^a
نانو آهن ۴ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 4 mg/kg	267 ^{cd}	13.4 ^{de}	2.32 ^{bc}	31.1 ^{ab}
نانو آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 6 mg/kg	270 ^{cd}	14.4 ^{cd}	2.10 ^{bc}	31.8 ^{ab}
نانو آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 8 mg/kg	285 ^{bc}	14.5 ^{cd}	1.99 ^{cd}	31.4 ^{ab}
نانو آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 10 mg/kg	267 ^{cd}	15.0 ^{bc}	2.12 ^{bc}	34.8 ^{ab}
سولفات کلسیم ۰/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 0.5 mM	289 ^{bc}	18.8 ^{ab}	1.55 ^d	25.9 ^d
سولفات کلسیم ۱ میلی مولار Calcium Sulfate 1 mM	319 ^{ab}	21.0 ^a	1.46 ^{de}	29.3 ^{cd}
سولفات کلسیم ۱/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 1.5 mM	318 ^{ab}	21.0 ^a	1.38 ^c	30.7 ^{bc}
سولفات کلسیم ۲ میلی مولار Calcium Sulfate 2 mM	330 ^a	21.7 ^a	1.29 ^c	30.2 ^{bc}
نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg ⁻¹)				
Zero	299 ^a	17.5 ^a	1.87 ^c	54.3 ^a
20	282 ^{ab}	16.2 ^{ab}	1.99 ^{ab}	35.5 ^b
40	276 ^{bc}	15.7 ^{ab}	1.95 ^b	30.0 ^{bc}
80	267 ^c	15.4 ^{bc}	2.05 ^a	22.6 ^{cd}
100	267 ^c	14.8 ^c	2.14 ^a	18.2 ^d

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی داری در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD با یکدیگر ندارند.

Means that have a common letter, have not significantly different together at 5% based on LSD test.

فیزیولوژیک بذر، سرعت ظهور گیاهچه را در کینوا حتی در شرایط تنش سرب تا حدی حفظ کند.

ضریب سرعت جوانه‌زنی: نتایج مقایسه میانگین سطوح پرایمینگ در هر سطح نیترا سرب (جدول ۲) نشان داد که با افزایش غلظت نیترا سرب، ضریب سرعت جوانه‌زنی کینوا به طور معنی‌داری کاهش یافت. در اغلب سطوح تنش، تیمارهای پرایمینگ نسبت به عدم پرایمینگ مقادیر بالاتری از این شاخص را نشان دادند و بیشترین ضریب سرعت جوانه‌زنی عمدتاً در تیمارهای سولفات کلسیم (۱ تا ۲ میلی‌مولار) مشاهده شد. این نتایج بیانگر آن است که پرایمینگ بذر توانسته است تا حدی از کاهش سرعت جوانه‌زنی ناشی از تنش سرب جلوگیری کند و ظهور گیاهچه را تسریع نماید. کاهش ضریب سرعت جوانه‌زنی در اثر تنش فلزات سنگین در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Parmoon *et al.*, 2014). همچنین گزارش شده است که پرایمینگ بذر می‌تولند با بهبود وضعیت فیزیولوژیکی بذر، موجب تسریع فرآیند جوانه‌زنی و افزایش سرعت ظهور گیاهچه شود (Zhou *et al.*, 2021).

متوسط زمان جوانه‌زنی: مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد که پرایمینگ با مواد مختلف موجب کاهش معنی‌دار متوسط زمان جوانه‌زنی کینوا نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین متوسط زمان جوانه‌زنی در تیمار شاهد با مقدار ۲/۷۸ روز مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار این صفت (۱/۲۹ روز) مربوط به تیمار سولفات کلسیم با غلظت ۲ میلی‌مولار بود که در پایین‌ترین کلاس آماری قرار گرفت. سایر تیمارها از جمله کلرید آهن ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم با مقدار ۲/۴۱ روز در کلاس‌های آماری بالاتری قرار داشتند (جدول ۳). در مقابل، کاربرد نیترا سرب باعث افزایش متوسط زمان جوانه‌زنی شد؛ به طوری که غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیترا سرب نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد نیترا سرب) افزایش ۱۴ درصدی این شاخص را به همراه داشت (جدول ۳). به طور کلی، مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تنش سرب و سایر فلزات سنگین باعث کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی به‌ویژه سرعت جوانه‌زنی می‌شوند (Rahman Khan and Mahmud Khan, 2010). از آنجا که بین سرعت جوانه‌زنی و متوسط زمان جوانه‌زنی رابطه عکس وجود دارد، کاهش سرعت جوانه‌زنی تحت تنش سرب با افزایش متوسط زمان جوانه‌زنی همراه است. به عنوان مثال، (Parmoon *et al.*, 2014) گزارش کردند که تیمار ذرت با نیترا سرب موجب افزایش متوسط زمان جوانه‌زنی و کاهش سرعت جوانه‌زنی گردید. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد که پرایمینگ بذر کینوا با مواد مختلف، متوسط زمان جوانه‌زنی را نسبت به تیمار شاهد (آب مقطر) کاهش داد. این نتیجه بیانگر آن است که پرایمینگ با فعال‌سازی

همچنین، برتری نانواهن نسبت به کلرید آهن در افزایش سرعت جوانه‌زنی نشان می‌دهد که آزادسازی تدریجی و کنترل‌شده آهن در نانوفر، امکان تأمین مؤثر Fe مورد نیاز برای فرآیندهای متابولیکی اولیه را فراهم کرده و از بروز سمیت یونی و تشکیل رادیکال‌های آزاد جلوگیری می‌کند. در مقابل، کلرید آهن با آزادسازی سریع یون‌های Fe و Cl باعث افزایش شوری و تولید گونه‌های فعال اکسیژن شده و فرآیند جوانه‌زنی را مختل می‌سازد (Roosta *et al.*, 2015). (Ameri *et al.*, 2011) نیز گزارش کردند که استفاده از سولفات آهن به عنوان پیش‌تیمار بذر فلفل باعث افزایش معنی‌دار سرعت جوانه‌زنی شد. به طور کلی، گیاهانی که در شرایط کمبود عناصر ریزمغذی مانند آهن قرار می‌گیرند، اغلب با سبزی‌نگی کمتر و شاخص بنيه ضعیف‌تری مواجه هستند (Prasad, 2003). از این رو، پیش‌تیمار بذر با آهن می‌تولند به بهبود جوانه‌زنی گیاهچه‌ها کمک نماید. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پرایمینگ با ترکیبات مؤثر، به‌ویژه سولفات کلسیم و سپس نانواهن، می‌تواند راهکاری کارآمد برای کاهش اثرات زیان‌بار تنش سرب و افزایش توان جوانه‌زنی بذر کینوا باشد.

شاخص سرعت جوانه‌زنی: نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی (جدول ۳) نشان داد که پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار شاخص سرعت جوانه‌زنی کینوا نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین مقدار این شاخص (۲۱) در تیمار سولفات کلسیم با غلظت ۱ میلی‌مولار مشاهده گردید که با سایر غلظت‌های این ترکیب اختلاف معنی‌داری نداشت. برتری سولفات کلسیم را می‌توان به نقش تنظیمی یون کلسیم در پایداری غشا و تنظیم سیگنال‌های سلولی در مراحل اولیه جوانه‌زنی نسبت داد. کلسیم با حفظ یکپارچگی غشای سلولی و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش، شرایط مناسبی برای آغاز سریع‌تر تقسیم و طولی شدن سلول‌های جنینی فراهم می‌کند و در نتیجه ظهور ریشه‌چه تسریع می‌شود.

تیمارهای حاوی آهن نیز نسبت به شاهد موجب افزایش شاخص سرعت جوانه‌زنی شدند که احتمالاً به دلیل نقش آهن در فعالیت سیستم‌های تنفسی و تولید انرژی در مراحل اولیه رشد جنین است. در مقابل، افزایش غلظت نیترا سرب موجب کاهش این شاخص گردید، به طوری که در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم حدود ۱۶ درصد کاهش نسبت به تیمار بدون سرب مشاهده شد. این کاهش را می‌توان به اثرات سمی سرب بر فعالیت آنزیم‌های متابولیکی و القای تنش اکسیداتیو نسبت داد که در نهایت موجب تأخیر در فعال شدن متابولیسم بذر و کاهش سرعت ظهور گیاهچه می‌شود (Khanna *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2013). در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که پرایمینگ با منابع کلسیم و آهن می‌تواند با بهبود وضعیت

مشخص شد که طول ساقچه‌چه تحت تأثیر مثبت نانواهن و کلرید آهن قرار گرفت، در حالی که سولفات کلسیم در سطوح تنش صفر، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب، بهبود معنی داری نسبت به تیمار عدم پرایمینگ ایجاد نکرد (جدول ۴).

پرایمینگ بذر به طور کلی طول ریشه‌چه کینوا را نسبت به شاهد افزایش داد که بیانگر بهبود فعالیت‌های متابولیکی و رشد اولیه گیاهچه در اثر آماده‌سازی بذر است (Gomez et al., 2021). بیشترین طول ریشه‌چه در تیمار کلرید آهن (۶ میلی گرم بر کیلوگرم) به دست آمد که می‌تواند به نقش آهن در افزایش فعالیت آنزیم‌های تنفسی، بهبود تولید انرژی و تقویت تقسیم و طول شدن سلولی نسبت داده شود (Vahdani Rashvanlouei et al., 2023). در مقابل، کاربرد نیترات سرب موجب کاهش قابل توجه طول ریشه‌چه شد؛ این امر احتمالاً ناشی از اختلال سرب در تقسیم سلولی، آسیب به ساختار غشاء و ایجاد تنش اکسیداتیو در بافت‌های در حال رشد ریشه است داد (Rahman Khan and Mahmud Khan, 2010).

پرایمینگ تا حد زیادی توانست اثرات منفی سرب را بر رشد گیاهچه تعدیل کند. تیمار نانواهن در بیشتر سطوح تنش سرب، بیشترین طول ساقچه‌چه را ایجاد کرد که نشان‌دهنده کارایی بالاتر این منبع آهن در بهبود رشد اولیه تحت شرایط تنش است. فراهمی زیستی بیشتر و آزادسازی تدریجی آهن در نانوذرات می‌تواند موجب تقویت فرایندهای متابولیکی و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش شود (Gupta et al., 2022). در مقابل، اگرچه کلرید آهن نیز اثر مثبت نشان داد، اما سولفات کلسیم در بسیاری از سطوح تنش نتوانست بهبود قابل توجهی نسبت به عدم پرایمینگ در طول ساقچه‌چه ایجاد کند که بیانگر نقش محدودتر آن در تحریک رشد طولی لندام‌های هوایی در مقایسه با منابع آهن است.

یافته‌های Atis et al. (2024) در سورگوم شیرین نشان داد که فلزات سنگین از جمله سرب، نیکل و کادمیوم باعث کاهش رشد گیاهچه می‌شوند و در دوزهای بالای ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر، رشد متوقف می‌گردد. به گزارش Chehregani Rad et al. (2017)، مسمومیت با سرب طول گیاهچه را کاهش می‌دهد؛ به نظر می‌رسد که ممانعت از رشد ریشه تحت تیمار سرب نتیجه بازدارندگی تقسیمات سلولی در مریستم ریشه است که توسط سرب القا می‌شود (Yang et al., 2010). اثرات بازدارندگی فلزات سنگین بر رشد اندام هوایی و ریشه به گونه‌ای است که منجر به توقف رشد گیاهچه‌ها می‌گردد، زیرا سمیت فلز سنگین، جذب و انتقال آب و مواد مغذی را مختل می‌کند و باعث کوتاهی، تورم و کج‌شدگی ریشه‌ها می‌شود (Rahman Khan and Mahmud Khan, 2010). همچنین Nawaz et al. (2017) نشان دادند که پرایمینگ ذرت با نیترات پتاسیم در شرایط تنش سرب، با افزایش تجمع اسیدهای آمینه آزاد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

زود هنگام فرایندهای متابولیکی بذر، شرایط لازم برای شروع سریع‌تر جوانه‌زنی را فراهم می‌کند (Gomez et al., 2021). در طی فرایند پرایمینگ، فعالیت‌های فیزیولوژیکی نظیر فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده مواد ذخیره‌ای، افزایش شدت تنفس و بهبود جذب آب آغاز می‌شود، بدون آنکه خروج ریشه‌چه رخ دهد. بنابراین پس از قرار گرفتن بذر در شرایط مساعد، مراحل جوانه‌زنی با سرعت بیشتری ادامه یافته و متوسط زمان جوانه‌زنی کاهش می‌یابد (Nourhosseini et al., 2016). در میان تیمارهای پرایمینگ، سولفات کلسیم کمترین متوسط زمان جوانه‌زنی را ایجاد کرد که نشان‌دهنده نقش مهم کلسیم در تسریع فرایندهای اولیه رشد گیاهچه است. کلسیم با تثبیت ساختار غشای سلولی، تنظیم نفوذپذیری انتخابی غشا و مشارکت در مسیرهای پیام‌رسانی سلولی، به حفظ یکپارچگی سلول‌ها و بهبود فعالیت آنزیم‌های مرتبط با جوانه‌زنی کمک می‌کند. این شرایط، انتقال مواد و انرژی را در بذر تسهیل کرده و در نهایت به خروج سریع‌تر ریشه‌چه و کاهش زمان لازم برای جوانه‌زنی منجر می‌شود (Zhou et al., 2021). همچنین اثر مثبت آهن را می‌توان به نقش این عنصر در سیستم‌های انتقال الکترون، فعالیت آنزیم‌های اکسیداسیون-احیا و تقویت فرایند تنفس نسبت داد. افزایش کارایی این فرایندها، تأمین سریع‌تر انرژی مورد نیاز برای رشد اولیه جنین و در نتیجه تسریع ظهور گیاهچه را به دنبال دارد (Vahdani Rashvanlouei et al., 2023).

طول ریشه‌چه و طول ساقچه‌چه: مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد که پرایمینگ بذر باعث افزایش معنی دار طول ریشه‌چه کینوا نسبت به تیمار شاهد (عدم پرایمینگ) شد (جدول ۳). بیشترین طول ریشه‌چه (۳۷/۸ میلی متر) در تیمار کلرید آهن با غلظت ۶ میلی گرم بر کیلوگرم حاصل گردید که با غلظت‌های ۴ و ۸ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید آهن تفاوت معنی داری نداشت. در مقابل، کاربرد نیترات سرب به طور معنی داری طول ریشه‌چه را کاهش داد، به طوری که غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب نسبت به شاهد (عدم کاربرد نیترات سرب) کاهش ۶۶ درصدی این صفت را به همراه داشت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد که نیترات سرب موجب کاهش طول ساقچه‌چه کینوا شد، اما پرایمینگ بذر نتوانست به طور مؤثری از شدت این اثرات منفی بکاهد (جدول ۴). در شرایط بدون تنش (صفر میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب)، تیمارهای نانواهن در غلظت‌های ۶ و ۸ میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین تأثیر مثبت را بر طول ساقچه‌چه نشان دادند. در سطوح تنش ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب، تیمار نانواهن با غلظت ۶ میلی گرم بر کیلوگرم بالاترین طول ساقچه‌چه را ایجاد کرد که نسبت به شاهد (عدم پرایمینگ در همان سطح تنش) به ترتیب ۶، ۲۲، ۱۸ و ۴۵ درصد افزایش نشان داد. همچنین

ریزمغذی مانند آهن، بنیه و استقرار ضعیف‌تری دارند (Prasad, 2003)؛ بنابراین پیش‌تیمار بذر با این عناصر می‌تواند جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه را بهبود بخشد. (Nourhosseini *et al.*, 2016). گزارش کرده‌اند که پیش‌تیمار با کلرید کلسیم نه تنها قدرت جوانه‌زنی بادم زمینی را افزایش می‌دهد، بلکه محتوای کلسیم بذر را نیز بالا می‌برد. پرایمینگ به طور کلی باعث افزایش انرژی و بنیه بذر می‌شود. به عنوان مثال، (Amraei & Omid, 2022) نشان داده‌اند که تیمار کلرید کلسیم در کینوا، شاخص بنیه بذر را افزایش می‌دهد. همچنین کاربرد کلسیم به تنهایی یا همراه با کادمیوم، به طور معنی‌داری سطح مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داده و اثرات سمی کادمیوم را می‌کاهد. افزون بر این، فعالیت آنزیم‌هایی مانند آمیلاز، ساکارز سنتتاز، اینورتاز و ساکارز فسفات سنتتاز در ریشه‌چه افزایش می‌یابد که از جمله اثرات مثبت پرایمینگ است (Zhou *et al.*, 2021). پرایمینگ با تحریک سنتز آنزیم‌های تجزیه‌کننده (مانند آمیلاز و پروتاز) موجب افزایش آزادسازی گلوکز در بذور شده و انرژی لازم برای رشد را فراهم می‌کند (Abdoli, 2020). در نهایت، پرایمینگ می‌تواند با جبران آثار مخرب رادیکال‌های آزاد اکسیژن، سطح انرژی در سلول را افزایش داده و بنیه بذر را تقویت کند، به طوری که تکثیر DNA در میتوکندری افزایش یافته و بنیه بذر ارتقاء می‌یابد (Wang *et al.*, 2018).

فعالیت آنزیم کاتالاز گیاهچه: نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نیتрат سرب، فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه‌های کینوا به طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین تیمارهای پرایمینگ اثر افزایشی بر فعالیت این آنزیم داشتند. مقایسه میانگین تیمارهای پرایمینگ در هر سطح نیترات سرب نشان داد که در تمامی سطوح تنش، اگرچه کلرید آهن بیشترین فعالیت کاتالاز را ایجاد کرد، اما برتری سولفات کلسیم در بسیاری از صفات جوانه‌زنی نشان می‌دهد که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به تنهایی برای بهبود عملکرد کافی نیست و مکانیسم‌هایی نظیر تثبیت غشا، تنظیم جذب یون‌ها و کاهش ورود سرب نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. در شرایط عدم کاربرد نیترات سرب و نیز در بالاترین سطح تنش (۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، بیشترین فعالیت کاتالاز در تیمارهای کلرید آهن ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم و سولفات کلسیم ۲ میلی مولار مشاهده شد که در یک گروه آماری قرار گرفتند. کمترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تمامی سطوح تنش مربوط به تیمار شاهد (عدم پرایمینگ) بود (جدول ۵). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز همراه با افزایش غلظت نیترات سرب، نشان‌دهنده تشدید تنش اکسیداتیو در گیاه است.

در ریشه، از سمیت سرب جلوگیری کرده و بذورهای پرایم‌شده با سرعت جذب آب بیشتر، متابولیسم بالاتری دارند و بازسازی بخش‌های تخریب‌شده را سریع‌تر انجام می‌دهند.

شاخص بنیه بذر: نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد که نیترات سرب باعث کاهش معنی‌دار شاخص بنیه بذر کینوا شد، اما پرایمینگ بذر توانست به طور مؤثری از شدت این اثرات منفی بکاهد (جدول ۴). در شرایط بدون تنش (صفر میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب)، کاربرد نانواهن در غلظت‌های ۴ و ۸ میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین شاخص بنیه بذر را ایجاد کرد که نسبت به تیمار شاهد (عدم پرایمینگ) به ترتیب ۴۲ و ۶۳ درصد افزایش نشان داد. همچنین در بالاترین سطح تنش (۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب)، تیمار کلرید آهن با غلظت ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم بالاترین شاخص بنیه بذر را به خود اختصاص داد و نسبت به شاهد ۳۳ درصد افزایش داشت (جدول ۴). شاخص بنیه بذر به عنوان معیاری از قدرت و سرزندگی بذر (Seed Vigor) عمل می‌کند؛ افزایش این شاخص بیانگر توانایی بیشتر بذر برای جوانه‌زنی سریع، یکنواخت و استقرار موفق گیاهچه در شرایط مختلف است. تنش‌های ناشی از فلزات سنگین می‌توانند بنیه بذر را تضعیف کرده و به کاهش جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه منجر شوند (Amini *et al.*, 2016). Parmoon *et al.* (2014) دریافتند که در غلظت‌های پایین فلزات سنگین، قدرت بذری ذرت تغییر معنی‌دار نمی‌کند، اما با افزایش غلظت، کاهش قابل توجهی مشاهده می‌شود؛ به عنوان مثال، مصرف ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیترات سرب کاهش شدیدی در قدرت بذری ذرت ایجاد کرد. پژوهش‌های دیگر روی یونجه نیز کاهش قدرت بذری در اثر فلزات سنگین را تأیید کرده‌اند (Peralta *et al.*, 2000). وجود فلزات سنگین در محیط جوانه‌زنی به دلیل نفوذ سریع به داخل بذر از طریق آب، فرآیندهای فیزیولوژیک مهمی مانند تنفس را مختل کرده و با جلوگیری از تقسیم سلولی، منجر به اختلال رشد گیاهچه می‌شود. همچنین افزایش غلظت فلزات سنگین باعث تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن، پراکسیداسیون لیپیدها و تشکیل مالون‌دی‌آلدهید می‌شود. تولید رادیکال‌های آزاد و پراکسیداسیون لیپیدها در اثر تنش اکسیداتیو، کارکرد غشای سلولی و نفوذپذیری انتخابی را مختل کرده و در نهایت به افزایش نشت مواد ذخیره‌ای بذر و کاهش بنیه بذر منجر می‌شود (Rahman Khan and Mahmud Khan, 2010). نتایج Vahdani Rashvanlouei *et al.* (2023) نشان داد که با افزایش غلظت سولفات آهن از ۳۰ به ۶۰ میلی مولار، بالاترین شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد و بنیه گیاهچه عدس به دست می‌آید. به طور کلی، گیاهان در شرایط کمبود عناصر

جدول ۴- مقایسه میانگین برهم کنش پرایمینگ و نیترات سرب برای طول ساقچه و شاخص بنیه گیاهچه در کینوا

Table 4 - Comparison of the mean interaction between priming and lead nitrate for Shoot length and Seedling vigor index in quinoa

پرایمینگ	طول ساقچه (میلی متر)					شاخص بنیه گیاهچه				
	Shoot length (mm)					Seedling vigor index				
	نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg ⁻¹)					نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg ⁻¹)				
پرایمینگ	Zero	20	40	80	100	Zero	20	40	80	100
شاهد Control	53.3 ^{bc}	42.7 ^{cd}	35.2 ^d	32.1 ^{bc}	28.8 ^{cd}	67.4 ^e	54.6 ^e	43.7 ^d	37.1 ^{cd}	35.3 ^{cd}
کلرید آهن ۱ Iron Chloride 4 mg/kg	53.8 ^{bc}	42.8 ^{cd}	42.2 ^{bc}	38.2 ^b	35.0 ^{ab}	89.6 ^d	66.6 ^{cd}	53.2 ^{cd}	49.6 ^{ab}	46.8 ^a
کلرید آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 6 mg/kg	56.3 ^{ab}	42.4 ^{cd}	42.9 ^{bc}	37.5 ^b	37.7 ^{ab}	103.9 ^{ab}	62.8 ^d	60.4 ^{bc}	51.6 ^b	45.4 ^{ab}
کلرید آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 8 mg/kg	57.2 ^{ab}	42.3 ^{cd}	41.9 ^{bc}	37.8 ^b	32.4 ^{bc}	105.7 ^{ab}	64.8 ^{cd}	61.4 ^{bc}	48.8 ^{bc}	43.8 ^{bc}
کلرید آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 10 mg/kg	56.3 ^{ab}	42.6 ^{cd}	40.0 ^{bc}	38.8 ^b	34.1 ^{ab}	112.3 ^a	68.8 ^{cd}	60.4 ^{bc}	52.5 ^a	47.0 ^a
نانو آهن ۴ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 4 mg/kg	55.5 ^{ab}	39.3 ^d	36.8 ^{cd}	32.1 ^{bc}	27.6 ^{cd}	92.1 ^{bc}	65.3 ^{cd}	56.0 ^{cd}	44.7 ^{bc}	36.5 ^{cd}
نانو آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 6 mg/kg	61.3 ^{ab}	50.4 ^a	49.9 ^a	45.1 ^a	41.7 ^a	114.9 ^a	77.4 ^a	65.2 ^{ab}	52.7 ^a	41.0 ^{bc}
نانو آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 8 mg/kg	65.0 ^a	48.7 ^{ab}	45.4 ^{ab}	37.4 ^b	34.5 ^{ab}	92.2 ^{bc}	67.8 ^{cd}	63.8 ^{bc}	47.7 ^{bc}	44.6 ^{ab}
نانو آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 10 mg/kg	63.8 ^a	45.7 ^{bc}	43.6 ^{bc}	37.0 ^b	31.3 ^{bc}	113.0 ^a	75.7 ^{ab}	58.7 ^{cd}	53.5 ^a	47.4 ^a
سولفات کلسیم ۰/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 0.5 mM	51.7 ^{bc}	44.8 ^{bc}	41.2 ^{bc}	24.4 ^{cd}	15.5 ^d	95.7 ^{bc}	78.6 ^a	64.5 ^{ab}	29.6 ^d	23.9 ^e
سولفات کلسیم ۱ میلی مولار Calcium Sulfate 1 mM	52.9 ^{bc}	41.8 ^{bc}	39.8 ^{bc}	15.7 ^d	12.2 ^d	103.5 ^{ab}	73.7 ^{ab}	66.8 ^{ab}	27.7 ^d	22.7 ^e
سولفات کلسیم ۱/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 1.5 mM	54.5 ^{ab}	46.9 ^{ab}	40.9 ^{bc}	25.2 ^{cd}	16.2 ^d	92.2 ^{bc}	72.0 ^{bc}	58.2 ^{cd}	45.0 ^{bc}	28.2 ^{de}
سولفات کلسیم ۲ میلی مولار Calcium Sulfate 2 mM	44.9 ^c	41.9 ^{bc}	41.3 ^{bc}	20.7 ^d	10.6 ^d	90.1 ^{cd}	73.0 ^{ab}	71.1 ^a	41.9 ^{cd}	21.1 ^e

مقایسه میانگین با استفاده از رویه L.S. Means انجام شده و در هر سطح نیترات سرب، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.
Means comparison was done using L. S. Means procedure at each level of lead nitrate; means with at least one common letter are not significantly different.

پیش تیمار سالیسیلیک اسید، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به ویژه کاتالاز افزایش می‌یابد. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تمامی سطوح نیترات سرب، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار کلرید آهن (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. آهن یکی از عناصر ریزمغذی ضروری برای گیاهان است که در ساختار بسیاری از آنزیم‌ها و پروتئین‌های دخیل در فرآیندهای اکسیداسیون و احیا نقش دارد و حضور آن می‌تواند کارایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی را افزایش دهد. تأمین مناسب آهن، احتمالاً با بهبود فعالیت آنزیم‌های وابسته به آهن و افزایش توانایی گیاه در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، موجب افزایش فعالیت کاتالاز در شرایط تنش سرب شده است (Vahdani Rashvanlouei *et al.*, 2023).

همچنین مشاهده شد که در شرایط عدم کاربرد نیترات سرب و نیز در بالاترین سطح تنش، بین تیمار کلرید آهن (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم) و سولفات کلسیم (۲ میلی مولار) اختلاف آماری معنی‌داری

فلزات سنگین از جمله سرب با برهم زدن تعادل متابولیکی سلول و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک، موجب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند پراکسید هیدروژن می‌شوند (Callahan *et al.*, 2005). تجمع این ترکیبات واکنش‌پذیر می‌تواند به اجزای سلولی از جمله لیپیدهای غشا، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک آسیب وارد کند. در چنین شرایطی، گیاه برای کاهش اثرات مخرب تنش، فعالیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی خود را افزایش می‌دهد. آنزیم کاتالاز به عنوان یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی با تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن، نقش کلیدی در کاهش تنش اکسیداتیو ایفا می‌کند. بنابراین افزایش فعالیت این آنزیم در سطوح بالاتر نیترات سرب را می‌توان به عنوان یک پاسخ سازگاری گیاه به شرایط تنش‌زا تفسیر کرد (Dinakar *et al.*, 2009). نتایج پژوهش (Soltanzadeh Pormehr *et al.*, 2021) روی گیاه شوید نیز نشان داد که با افزایش تنش سرب و همچنین افزایش غلظت

می‌تواند موجب تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه شود. در نتیجه، افزایش فعالیت پراکسیداز در تیمار کلرید آهن احتمالاً به دلیل بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه و افزایش ظرفیت آن برای خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش سرب بوده است (Vahdani Rashvanlouei *et al.*, 2023). از سوی دیگر، اثر مثبت سولفات کلسیم بر فعالیت این آنزیم را می‌توان به نقش کلسیم در پایداری غشاهای سلولی، تنظیم فعالیت آنزیم‌ها و مشارکت در مسیره‌های پیام‌رسانی سلولی نسبت داد. کلسیم به عنوان یک عنصر تنظیم‌کننده در پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه به تنش‌های محیطی شناخته می‌شود و می‌تواند با افزایش پایداری ساختارهای سلولی و بهبود عملکرد سیستم دفاعی، تحمل گیاه را در برابر تنش‌های ناشی از فلزات سنگین افزایش دهد. در مقابل، در تیمار شاهد (عدم پرایمینگ) به دلیل نبود تقویت اولیه سیستم‌های دفاعی و وضعیت تغذیه‌ای ضعیف‌تر گیاه، فعالیت آنزیم پراکسیداز در تمامی سطوح تنش نیتрат سرب در پایین‌ترین مقدار مشاهده شد (Zhou *et al.*, 2021). اگرچه هر دو آنزیم کاتالاز و پراکسیداز در تجزیه H_2O_2 نقش دارند، اما کاتالاز عمدتاً در پراکسیزوم‌ها و با میل ترکیبی بالا عمل می‌کند، در حالی که پراکسیدازها در فضاهای مختلف سلولی (از جمله دیواره سلولی) حضور دارند و در اکسیداسیون سوبسترهای مختلف علاوه بر H_2O_2 مشارکت می‌کنند (Apel & Hirt, 2004).

محتوای سرب گیاهچه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش پرایمینگ و نیترات سرب در سطح احتمال ۵ درصد بر محتوای سرب گیاهچه کینوا معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین تیمارهای پرایمینگ در سطوح مختلف نیترات سرب (جدول ۷) نشان داد که با افزایش غلظت نیترات سرب، محتوای سرب در گیاهچه نیز به طور معنی‌داری افزایش یافت، اما پرایمینگ بذرها کینوا با کلرید آهن (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از تجمع سرب در گیاهچه کاست. در شرایط عدم کاربرد نیترات سرب، هیچ گونه تجمع از سرب در گیاهچه مشاهده نشد. در سطح ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیترات سرب، تیمار پرایمینگ به طور کامل از تجمع سرب جلوگیری کرد. در سطوح ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیترات سرب، تیمار کلرید آهن (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به ترتیب باعث کاهش ۲/۸۵، ۸/۷۳ و ۴/۴۸ درصدی در محتوای سرب گیاهچه نسبت به تیمار عدم پرایمینگ شد (جدول ۷). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، با افزایش غلظت نیترات سرب در محیط رشد، میزان تجمع سرب در گیاهچه نیز افزایش یافت. این افزایش می‌تواند ناشی از قابلیت جذب و انتقال فلزات سنگین توسط گیاه از محیط رشد به بافت‌های گیاهی باشد؛ به طوری که با افزایش غلظت سرب در محیط، میزان ورود این عنصر به ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی نیز بیشتر می‌شود.

وجود نداشت. این موضوع نشان می‌دهد که سولفات کلسیم نیز توانسته است تا حدودی اثرات تنش اکسیداتیو را کاهش دهد. کلسیم با نقش در پایداری غشاهای سلولی، تنظیم نفوذپذیری غشا و شرکت در مسیره‌های پیام‌رسانی سلولی، می‌تواند تحمل گیاه را نسبت به تنش‌های محیطی از جمله فلزات سنگین افزایش دهد. حضور کلسیم همچنین ممکن است با کاهش ورود یا انتقال سرب در بافت‌های گیاه، شدت آسیب‌های اکسیداتیو را کاهش داده و در نتیجه فعالیت آنزیم‌های دفاعی را در سطح بالاتری حفظ کند (Zhou *et al.*, 2021).

فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه: نتایج مقایسه میانگین

تیمارهای پرایمینگ در سطوح مختلف تنش نیترات سرب نشان داد که با افزایش غلظت نیترات سرب، فعالیت آنزیم پراکسیداز به طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین کاربرد تیمارهای پرایمینگ اثر افزایشی بر این صفت داشت. به طوری که بیشترین فعالیت این آنزیم در تیمار کلرید آهن با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد و پس از آن تیمار سولفات کلسیم با غلظت ۲ میلی‌مولار قرار داشت. کمترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در تمامی سطوح تنش مربوط به تیمار شاهد (عدم پرایمینگ) بود (جدول ۵). افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز همراه با افزایش غلظت نیترات سرب را می‌توان به تشدید تنش اکسیداتیو در گیاه تحت تأثیر فلز سنگین سرب نسبت داد. سرب با ایجاد اختلال در فرآیندهای متابولیکی و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، موجب افزایش پراکسید هیدروژن و سایر ترکیبات واکنش‌پذیر در سلول می‌شود. در چنین شرایطی، گیاه برای کاهش اثرات مخرب این ترکیبات، فعالیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی خود را افزایش می‌دهد (Callahan *et al.*, 2005). آنزیم پراکسیداز یکی از اجزای مهم این سیستم دفاعی است که با تجزیه پراکسید هیدروژن و شرکت در واکنش‌های اکسیداسیون-کاهش، نقش مهمی در محافظت از ساختارهای سلولی در برابر آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو ایفا می‌کند. بنابراین افزایش فعالیت این آنزیم در سطوح بالاتر نیترات سرب بیانگر فعال شدن مکانیسم‌های دفاعی گیاه در برابر تنش فلزات سنگین است (Dinakar *et al.*, 2009). مطالعه Soltanzadeh Pormehr *et al.* (2021) روی گیاه شوید نیز نشان داد که با افزایش میزان تنش سرب، فعالیت آنزیم پراکسیداز افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که کاربرد تیمارهای پرایمینگ موجب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز نسبت به تیمار شاهد (عدم پرایمینگ) شد.

بیشترین میزان فعالیت این آنزیم در تیمار کلرید آهن (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده گردید و تیمار سولفات کلسیم (۲ میلی‌مولار) در رتبه بعدی قرار گرفت. آهن به عنوان یکی از عناصر ریزمغذی ضروری، در ساختار بسیاری از آنزیم‌ها و ترکیبات دخیل در واکنش‌های اکسیداسیون و احیا نقش دارد و تأمین مناسب آن

جدول ۵- مقایسه میانگین برهم کنش پرایمینگ و نیترات سرب برای فعالیت آنزیم کاتالاز و فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه در کینوا

Table 5 - Comparison of the mean interaction between priming and lead nitrate on germination percentage, Germination rate and Coefficient of Velocity of Germination in quinoa

پرایمینگ	فعالیت آنزیم کاتالاز گیاهچه (میلی مول بر گرم در دقیقه) Seedling Catalase Activity ($\mu\text{mol/g FW/min}$)					فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه (تغییرات جذب بر گرم وزن تر برگ) Seedling Peroxidase Activity (Absorbance change/g FW/min)				
	نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg^{-1})					نیترات سرب (میلی گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg kg^{-1})				
	Zero	20	40	80	100	Zero	20	40	80	100
	پرایمینگ									
شاهد Control	14.5 ^g	16.3 ⁱ	20.3 ^g	24.3 ^h	26.1 ^h	2.01 ^h	2.03 ^g	2.13 ^c	2.19 ^g	2.89 ^f
کلرید آهن ۱ Iron Chloride 4 mg/kg	18.2 ^c	20.5 ^g	23.7 ^e	28.0 ^f	30.2 ^e	2.76 ^{de}	2.96 ^c	3.29 ^{bc}	3.86 ^c	4.46 ^{bc}
کلرید آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 6 mg/kg	21.8 ^c	21.7 ^g	24.6 ^{de}	30.1 ^e	32.4 ^c	2.94 ^g	3.06 ^f	3.44 ^c	4.14 ^f	4.45 ^e
کلرید آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 8 mg/kg	21.5 ^c	24.0 ^d	26.6 ^{bc}	32.4 ^c	32.7 ^c	3.10 ^d	3.32 ^{de}	3.67 ^{de}	4.55 ^d	4.40 ^{de}
کلرید آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Iron Chloride 10 mg/kg	24.5 ^a	28.2 ^a	30.8 ^a	35.6 ^a	36.3 ^a	3.57 ^a	3.91 ^a	4.26 ^a	5.07 ^a	5.06 ^a
نانو آهن ۴ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 4 mg/kg	14.0 ^g	17.5 ⁱ	20.3 ^g	25.0 ^h	27.1 ^g	2.19 ^f	2.55 ^{cd}	2.83 ^d	3.43 ^{cd}	3.87 ^c
نانو آهن ۶ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 6 mg/kg	15.9 ^f	18.7 ^h	21.9 ^f	27.6 ^g	27.8 ^g	2.42 ^e	2.75 ^{ef}	3.33 ^e	3.87 ^c	3.86 ^c
نانو آهن ۸ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 8 mg/kg	17.5 ^e	20.8 ^g	24.0 ^e	28.8 ^f	29.2	2.76 ^{cd}	2.99 ^c	3.32 ^e	4.02 ^d	4.05 ^d
نانو آهن ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Nano Iron 10 mg/kg	19.0 ^e	21.0 ^g	24.9 ^d	30.2 ^{de}	30.8 ^e	2.80 ^{de}	2.92 ^c	3.58 ^{de}	4.13 ^d	4.23 ^{cd}
سولفات کلسیم ۰/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 0.5 mM	19.5 ^{de}	22.3 ^f	25.9 ^c	30.8 ^d	31.4 ^d	2.77 ^{de}	3.14 ^{cde}	3.62 ^d	4.25 ^c	4.28 ^{cd}
سولفات کلسیم ۱ میلی مولار Calcium Sulfate 1 mM	20.3 ^{cd}	23.8 ^e	26.9 ^{bc}	32.8 ^c	32.3 ^c	2.85 ^{de}	3.37 ^{cd}	3.87 ^d	4.47 ^c	4.56 ^{bc}
سولفات کلسیم ۱/۵ میلی مولار Calcium Sulfate 1.5 mM	22.9 ^b	25.0 ^e	28.2 ^b	33.6 ^{bc}	33.9 ^b	3.30 ^{bc}	3.62 ^c	4.02 ^c	4.25 ^c	4.74 ^b
سولفات کلسیم ۲ میلی مولار Calcium Sulfate 2 mM	24.2 ^a	27.42 ^b	27.4 ^{bc}	34.4 ^b	35.8 ^a	3.50 ^b	3.76 ^b	4.21 ^b	4.92 ^a	4.98 ^a

مقایسه میانگین با استفاده از رویه L.S. Means انجام شده و در هر سطح نیترات سرب، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه اختلاف معنی داری با هم ندارند.
Means comparison was done using L. S. Means procedure at each level of lead nitrate; means with at least one common letter are not significantly different.

یون‌های آهن و سرب در محل‌های جذب ریشه است؛ به طوری که حضور آهن کافی ممکن است مانع ورود بیش از حد یون‌های سرب به داخل بافت‌های گیاه شود. علاوه بر این، آهن با بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه و افزایش فعالیت سیستم‌های دفاعی و آنتی‌اکسیدانی می‌تواند تحمل گیاه را در برابر تنش فلزات سنگین افزایش دهد (Vahdani Rashvanlouei *et al.*, 2023).

در گیاهان، انتقال یون‌ها از طریق غشای سلولی توسط پروتئین‌هایی به نام ترانسپورترها (حمل‌کننده‌های یونی) میانجی‌گری می‌شود. این ترانسپورترها انتقال‌دهنده یون‌های خاص بوده و به صورت اختصاصی عمل می‌کنند. قسمت اعظم این یون‌ها به طور فیزیکی جذب دیواره سلولی می‌شوند (Aghaei *et al.*, 2019). یکی دیگر از دلایل افزایش میزان سرب در گیاهچه ممکن است تجمع آن‌ها در واکوئل‌ها باشد.

با این حال، پرایمینگ بذر با برخی ترکیبات توانست تا حدودی از تجمع سرب در گیاهچه بکاهد. به طوری که پرایمینگ بذرهای کینوا با کلرید آهن (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم) کاهش قابل توجهی در محتوای سرب گیاهچه ایجاد کرد. در شرایط عدم کاربرد نیترات سرب، هیچ گونه تجمعی از سرب در گیاهچه مشاهده نشد که امری طبیعی و نشان‌دهنده عدم حضور این فلز در محیط رشد است. همچنین در سطح ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیترات سرب، تیمار پرایمینگ توانست تا حد زیادی از تجمع سرب در گیاهچه جلوگیری کند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پرایمینگ بذر با آهن می‌تواند نقش مؤثری در کاهش جذب و تجمع سرب در بافت‌های گیاه داشته باشد. یکی از دلایل احتمالی این پدیده، رقابت بین

برآیند این عمل، انتقال کم سرب به بخش‌های هوایی گیاه خواهد بود (Callahan *et al.*, 2005).

بر اساس نتایج تحقیق (Rezaei *et al.* (2022)، بیشترین مقدار سرب شاخساره گیاه آویشن (۴/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به دست آمده است.

در بیشتر گیاهان، میزان انباشت فلزات سنگین در ریشه بیشتر از اندام‌های هوایی است. برخی از پژوهشگران معتقدند که به دلیل سمیت غلظت بالای سرب برای سیتوسول در فرم آزاد، سلول‌های گیاهی تلاش می‌کنند با استفاده از راهکارهایی نظیر اتصال آن به دیواره سلولی، ذخیره در واکوئل و کلاته کردن توسط فیتوکلاتین‌ها، این عنصر را در ریشه تثبیت کرده و بدین شکل از سمیت آن بکاهند.

جدول ۶. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش سرب و پرایمینگ بر محتوای سرب گیاهچه کینوا.

Table 6. Results of variance analysis (mean squares) for the effects of lead stress and priming on Seedling Lead Content in quinoa.

محتوای سرب گیاهچه Seedling Lead Content	درجه آزادی df	منابع تغییرات S. O. V
38.3**	1	پرایمینگ (A) Priming (A)
0.188**	4	سرب (B) Lead (B)
0.007*	4	اثر متقابل A×B B×Interaction A
0.005	20	خطا Error
12.3		ضریب تغییرات (درصد) C. V (%)

^{ns}, * و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪ را نشان می‌دهد.
^{ns}, * and ** represent not significant and significant at 5% and 1% probability, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین برهم‌کنش پرایمینگ و نیترات سرب برای محتوای سرب گیاهچه در کینوا

Table 7 - Comparison of the mean interaction between priming and lead nitrate for Seedling Lead Content in quinoa

محتوای سرب گیاهچه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Seedling Lead Content (mg/kg)					
نیترات سرب (میلی‌گرم در کیلوگرم) lead nitrate (mg/kg)					
پرایمینگ Priming	Zero	20	40	80	100
شاهد Control	0.00 ^{bc}	0.009 ^{cd}	0.027 ^d	0.084 ^{bc}	0.250 ^{cd}
کلرید آهن ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم Iron Chloride 10 mg/kg	0.00 ^{ab}	0.000 ^{cd}	0.004 ^{bc}	0.022 ^b	0.129 ^{ab}

مقایسه میانگین با استفاده از رویه L.S. Means انجام شده و در هر سطح نیترات سرب، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.
Means comparison was done using L. S. Means procedure at each level of lead nitrate; means with at least one common letter are not significantly different.

نتیجه گیری

پاسخ به تنش را بهبود بخشد. بیشترین فعالیت این آنزیم‌ها در تیمار پرایمینگ با ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید آهن مشاهده شد و پس از آن سولفات کلسیم در غلظت ۲ میلی مولار قرار گرفت، در حالی که کمترین فعالیت آنزیمی در تیمار عدم پرایمینگ به دست آمد. افزایش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز در تیمارهای پرایمینگ نشان‌دهنده افزایش تولدایی گیاه در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش فلزات سنگین است. از سوی دیگر، نتایج مربوط به محتوای سرب در گیاهچه نیز نشان داد که با افزایش غلظت نیترات سرب در محیط رشد، تجمع این فلز در گیاهچه‌ها افزایش یافت، اما پرایمینگ بذر به‌ویژه با کلرید آهن توانست به طور قابل توجهی از تجمع سرب در بافت‌های گیاهچه بکاهد. به‌طوری که در سطوح مختلف تنش سرب، تیمار ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید آهن بیشترین کاهش در محتوای سرب گیاهچه را ایجاد کرد. این موضوع نشان می‌دهد که پرایمینگ با آهن علاوه بر بهبود رشد و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، می‌تواند در کاهش جذب یا انتقال سرب در بافت‌های گیاهی نیز نقش مؤثری داشته باشد.

منابع

Abdoli, M. (2020). The effect of seed aging and hydro-priming on germination indices and the activity of some antioxidant enzymes in maize hybrid (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 7(2), 147-159. [In Persian].

Abdul-Baki, A. A., & Anderson, J. D. (1973). Vigor determination in soybean seed by multiple criteria 1. *Crop science*, 13(6), 630-633.

Afzal, I., Basra, S. M. A., Ahmad, N., & Farooq, M. (2015). Optimization of hormonal priming techniques for alleviation of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cereal Research Communications*, 33(4), 629-634. <https://doi.org/10.1007/BF03543587>

Aghaei, K., Rah-khosravani, B., Moghanloo, L., & Ghotbi Ravandi, A. A. (2019). Investigating the effect of cadmium accumulation on some biochemical and physiological characteristics in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Plant Process and Function*, 8(33), 107-122. [In Persian].

Alharby, H. F., Al-Zahrani, H. S., & Abbas, G. (2022). Potassium and silicon synergistically increase cadmium and lead tolerance and phytostabilization by quinoa through modulation of physiological and biochemical attributes. *Toxics*, 10(4), 169. <https://doi.org/10.3390/toxics10040169>

Ameri, A., Fatemi, H., Aroiee, H., & Teixeira da Silva, J.A. (2011). What's the Effect of Saline Priming on Germination Factors of *Capsicum annuum* var. 'California Wonder Seeds? *Seed Science and Biotechnology*, 5(1), 47-49.

Amini, F., Balouchi, H. R., Movahedi Dehnavi, M., & Attarzadeh, M. (2016). Effect of different concentrations of some heavy metals on germination indices and seed vigor

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که تنش نیترات سرب اثر منفی معنی‌داری بر جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه کینوا دارد، اما پرایمینگ بذر توانست به‌طور مؤثری از شدت این اثرات بکاهد. در میان تیمارهای پرایمینگ، سولفات کلسیم به‌ویژه در غلظت‌های ۱ تا ۲ میلی مولار به‌عنوان برترین تیمار در بهبود صفات جوانه‌زنی از جمله ضریب و سرعت جوانه‌زنی و کاهش متوسط زمان جوانه‌زنی شناخته شد و در اکثر سطوح تنش سرب، پایداری بیشتری در حفظ این صفات نشان داد. در مقابل، برای صفات مرتبط با رشد گیاهچه و بنیه بذر، منابع آهن کارآمدتر بودند؛ به‌طوری که نانواهن در غلظت‌های ۴ تا ۸ میلی گرم در کیلوگرم در شرایط بدون تنش و تنش‌های خفیف، و کلرید آهن در غلظت حدود ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم در تنش شدید سرب، بیشترین شاخص بنیه بذر و رشد طولی لندام‌ها را ایجاد کردند. علاوه بر این، بررسی شاخص‌های فیزیولوژیک نشان داد که با افزایش سطوح نیترات سرب، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز افزایش یافت که بیانگر تشدید تنش اکسیداتیو در گیاهچه‌های کینوا است. در این شرایط، پرایمینگ بذر توانست با تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه،

of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 3(2), 95-105. [In Persian].

Amraei, N., & Omid, H. (2022). Evaluation of the effects of insecticide pre-treatments at different temperatures on germination indices and seedling growth of fuzzy and delinted seeds of two cotton cultivars in the study of seedling growth and germination indices of quinoa genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed Research*, 12(1), 46-53. [In Persian].

Andrade, V. L., Ribeiro, I., Dos Santos, A. P. M., Aschner, M., & Mateus, M. L. (2023). Metals in Cow Milk and Soy Beverages: Is There a Concern? *Toxics*, 11(12), 1013. <https://doi.org/10.3390/toxics11121013>

Ansari, O., Gherekhloo, J., Kamkar, B., and Ghaderi-Far, F. (2016). Breaking seed dormancy and determining cardinal temperatures for *Malva sylvestris* using nonlinear regression. *Seed Science and Technology*, 44(3), 1-14.

Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373-399. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>

Arnold, B.R., Fenner, M., & Edwards, P. (1991). Changes in germinability, ABA content, and ABA embryonic sensitivity in developing seeds of *Sorghum bicolor* (L.) Moench induced by water stress during grain filling. *New Phytologist*, 118, 339-347.

Atis, I., Çelik, H., & Ertekin, I. (2024). Germination and early seedling growth in sweet sorghum exposed to heavy metal stress under seed priming pretreatments. *International Journal of Agriculture and Wildlife Science*, 10(2), 257-272.

Aygun, Y. Z., Atis, I., & Ertekin, I. (2022). Kadmiyum

stresi (CdCl₂) altında farklı kinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotiplerinin çimlenme ve ilk fide gelişimi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 27(1), 1-8.

Bajji M., Kinet, J.M., & Lutts, S. (2002). Osmotic and ionic effects of NaCl on germination early seedling growth and ion content of *Atriplex halimus* (chenopodiaceae). *Canadian Journal of Botany*, 80, 297-304.

Bamagoos, A.A., Alharby, H.F., & Abbas, G. (2022). Differential uptake and translocation of cadmium and lead by quinoa: A multivariate comparison of physiological and oxidative stress responses. *Toxics*, 10(2), 68.

Borsani, O., Valpuesta, V., & Botella, M.A. (2001). Evidence for a role of salicylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in Arabidopsis seedlings. *Plant physiology*, 126(3), 1024-1030. <https://doi.org/10.1104/pp.126.3.1024>

Callahan, D. L., Baker, A. J. M., Kolev, S. D., & Wedd, A. G. (2005). Metal ion ligands in hyper accumulating plants. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 11(1), 2-12.

Chehregani Rad, A., Farzan, S., & Shirkhani, Z. (2017). A study on the effect of lead treatment on some morphological and physiological indices of petunia (*Petunia hybrida* L.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 30(1), 47-57. [In Persian].

Dhindsa, R.S., & Matowe, W. (1981). Drought tolerance in two mosses: correlated with enzymatic defense against lipid peroxidation. *Journal of Experimental Botany*, 32(1), 79-91.

Dinakar, N., Nagajyoth, P.C., Suresh, S., Damodharam, T., & Suresh, C. (2009). Cadmium induced changes on proline, antioxidant enzymes, nitrate and nitrite reductases in *Arachis hypogaea* L. *Journal of Environmental Biology*, 30(2), 289-294.

Esechie, H. A. (1994). Effect of temperature on salinity tolerance of Desmodium at germination stage. In Plant Production on the Threshold of a New Century: Proceedings of the International Conference at the Occasion of the 75th Anniversary of the Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, held June 28–July 1, 1993 (pp. 447-449). Dordrecht: Springer Netherlands

Gomez, A., Narayan, M., Zhao, L., Jia, X., Bernal, R.A., Lopez-Moreno, M.L., & Peralta-Videa, J.R. (2021). Effects of nano-enabled agricultural strategies on food quality: Current knowledge and future research needs. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123385. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123385>

Gupta, N., Singh, P.M., Sagar, V., Pandya, A., Chinnappa, M., Kumar, R., & Bahadur, A. (2022). Seed priming with ZnO and Fe₃O₄ nanoparticles alleviate the Lead toxicity in *Basella alba* L. through reduced Lead uptake and regulation of ROS. *Plants*, 11, 2227. <https://doi.org/10.3390/plants11172227>

Hashemi Shahraki, Sh. (2025). Growth and Biochemical Responses of Sadough Quinoa (*Chenopodium quinoa*) under Lead Stress. *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Stuffs*, 5(2), 61-71. [In Persian]. DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1222724>.

Iftikhar, A., Abbas, G., Saqib, M., Shabbir, A., Amjad, M., Shahid, M. (2022). Salinity modulates lead

(Pb) tolerance and phytoremediation potential of quinoa: A multivariate comparison of physiological and biochemical attributes. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(1), 257-72.

Ikic, I., Maric evic, M., Tomasovic, S., Gunjaca, J., Atovic, Z. S., & Arcevic, H. S. (2012). The effect of germination temperature on seed dormancy in Croatian-grown winter wheats. *Euphytica*, 188, 25-34. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0695-8>

ISTA. (2012). International rules for seed testing, edition 2012. Bassersdorf. Switzerland.

Jacobsen, S.E., Liu, F., & Jensen, C.R. (2009). Does root-sourced ABA play a role for the regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Horticulturae*, 122, 281-287.

Jini, D., & Joseph, B. (2017). Physiological mechanism of salicylic acid for alleviation of salt stress in rice. *Rice Science*, 24(2), 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.0>

Karim, M.N., Sani, M.N.H., Uddain, J., Azad, M.O.K., Kabir, M.S., Rahman, M.S., Choi, K.Y., & Naznin, T. (2020). Stimulatory effect of seed priming as a pretreatment factor on germination and yield performance of yard long bean (*Vigna unguiculata*). *Horticulturae*, 6(104), 1-13.

Khan, M.I., Fatma, M., Per T.S., Anjum N., & Khan, A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 462-770. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26175738>

Khanna, K., Kohli, S. K., Bali, S., Kaur, P., Saini, P., Bakshi, P., & Bhardwaj, R. (2018). Role of micro-organisms in modulating antioxidant defence in plants exposed to metal toxicity. In *plants under metal and metalloid stress*, 303 - 335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.07.005>

Li, H., Sun, Y. L., Yu, X. H., Guo, H. P., Lian, H. F., Sun, X. D., Shi, Q. H., & Liu, S. Q. (2015). Effects of exogenous calcium on the growth and physiological traits of garlic seedlings under cadmium stress. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 25(3), 107-113.

Mahdi, I., Fahsi, N., Hafidi, M., Benjelloun, S., Allaoui, A., & Biskri, L. (2021). Rhizospheric phosphate solubilizing *Bacillus atrophaeus* GQJK17 S8 increases quinoa seedling, withstands heavy metals, and mitigates salt stress. *Sustainability*, 13(6), 3307. <https://doi.org/10.3390/su13063307>

Mazhar, M. W., Ishtiaq, M., Maqbool, M., & Akram, R. (2020). Seed priming with Calcium oxide nanoparticles improves germination, biomass, antioxidant defense and yield traits of canola plants under drought stress. *South African Journal of Botany*, 151, 889-899. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.10.031>

Miller, T., & Chapman, S. J. (1978). Germination responses of three forage grasses to different concentration of six salts. *Journal of Range Management*, 31(2), 123-124. <http://dx.doi.org/10.2307/3897659>

Motuzova, G. V., Minkina, T. M., Karpova, E. A., Barsova, N. U., & Mandzhieva, S. S. (2014). Soil contamination with heavy metals as a potential and real risk to the environment. *Journal of Geochemical Exploration*.

- 144, 241 - 246.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.016>
- Naik, S., Paramesh, R., Siddaraju, R., & Ravi Shankar, P. (2020).** Studies on growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 393-397.
<https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1f.8278>
- Najafi, Gh., Khomari, S., & Javadi, A. (2015).** Germination response of canola seeds to seed vigor changes and hydropriming. *Seed Science Research*, 45(4), 55-70.
<https://doi.org/20.1001.1.22520961.1394.5.17.6.9>
- Nawaz, F., Naeem, M., Akram, A., Ashraf, M.Y., Ahmad, K.S., Zulfikar, B., Sardar, H., Shabbir, R.N., Majeed, S., Shehzad, M.A., & Anwar, I. (2017).** Seed priming with KNO₃ mediates biochemical processes to inhibit lead toxicity in maize (*Zea mays* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(14), 4780-4789.
- Nourhosseini, S.A., Safarzadeh, M.N., & Sadeghi, S.M. (2016).** Evaluation of germination energy, germination value, and seed vigor indices in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Iranian Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 29(1), 221-234. [In Persian]
- Nouri, M., & Haddioui, A. (2021).** Improving seed germination and seedling growth of *Lepidium sativum* with different priming methods under arsenic stress. *Acta Ecologica Sinica*, 41(1), 64-71.
<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2020.08.004>
- Orchard, T. J. (1977).** Estimating the parameters of plant seedling emergence.
- Palve, S., Ahire, D., & Gahile, Y. (2022).** Salicylic acid pretreatment effects on *Beta vulgaris* L. multigerm germination and germination indices. *International Journal of Biosciences*, 20(1), 59-71.
- Park, J.H., Choppala, G., Lee, S.J., Bolan, N., Chung, J.W., & Edraki M. (2013).** Comparative sorption of Pb and Cd by biochars and its implication for metal immobilization in soils. *Water, Air and Soil Pollution*, 224: 1-12.
- Parmon, G., Ebadi, A., Ghahramani, M., & Mousavi, S. A. (2014).** The effect of heavy metals on germination indices and vigor of maize seeds under laboratory conditions. *Seed Research*, 4(12), 40-51. [In Persian].
- Peralta, J.R., Gardea-Torresdey, J.L., & Tiemann, K.J. (2000).** Study of the effects of heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*) grown in solid media. Proceedings of the 2000 Conference on Hazardous Waste Research, pp. 135-140.
- Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P., & Pinelli, E. (2011).** Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 213, 113 - 136.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.047>
- Prasad, A.S. (2003).** Zinc deficiency. *British Medical Journal*. 326: 409-410.
- Rahman Khan, M., & Mahmud Khan, M. (2010).** Effect of varying concentrations of nickel and cobalt on the plant growth and yield of chickpea. *Australian Journal Basic and Applied Science*, 4(6), 1036-104.
- Rezaei, B., Amirinejad, A. A., & Ghobadi, M. (2022).** Interaction effects of lead nitrate, salicylic acid, and biochar on the growth characteristics of thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Journal of Water and Soil*, 36(1), 67-79. [In Persian].
- Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A., & Waris, A. A. (2019).** Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214, 269-277.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.120>
- Roosta, H.R., Jalali, M., & Ali Vakili Shahrababaki, S.M. (2015).** Effect of Nano Fe-Chelate, FeEddha and FeSO₄ on Vegetative Growth, Physiological Parameters and Some Nutrient Elements Concentrations of Four Varieties of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) In NFT System. *Journal of Plant Nutrient*, 38, 2176-2184.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1043378>
- Sekabira, K., Oryem-Origa, H., Mutumba, G., Kakudidi, E., & Basamba, T.A. (2011).** Heavy metal phytoremediation by *Commelina benghalensis* (L) and *Cynodon dactylon* (L) growing in Urban stream sediments. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 3(8), 133-142.
- Shah, A. A., Ahmed, S., Abbas, M., & Yasin, N. A. (2020).** Seed priming with 3-epibrassinolide alleviates cadmium stress in *Cucumis sativus* through modulation of antioxidant system and gene expression. *Scientia Horticulturae*, 265, 109203.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109203>
- Soltanzadeh Pormehr, S., Maleki Lajayer, H., Torabi Giglou, M., Esmailpour, B., Chamani, E., & Pourbeyrami Hir, Y. (2021).** Effects of dill seed priming with salicylic acid under lead and cadmium heavy metal stress. *Journal of Seed Research*, 4(3), 33-44. [In Persian].
- Taie, H. A., El-Yazal, M. A. S., Ahmed, S. M., & Rady, M. M. (2019).** Polyamines modulate growth, antioxidant activity, and genomic DNA in heavy metal-stressed wheat plant. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 22338-22350.
- Vahdani Rashvanlouei, M., Jami Al-Ahmadi, M., Siari Zehan, M.H., Shorideh, H., & Mostafaei, M. (2023).** Effect of seed nutritional priming with iron sulfate and zinc sulfate on germination characteristics and seedling growth of lentil seeds. *Seed Research*, 13(2), 1-14. [In Persian]
- Venkatachalam, P., Jayalakshmi, N., Geetha, N., Sahi, S. V., Sharma, N. C., Rene, E. R., Sarkar, S. K., & Favas P. J. C. (2017)** Accumulation efficiency, genotoxicity and antioxidant defense mechanisms in medicinal plant *Acalypha indica* L. under lead stress. *Chemosphere*, 171, 544-553.
- Wang, W., He, A., Peng, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2018).** The effect of storage condition and duration on the deterioration of primed rice seeds. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1-17.
- Xin, Y., Liu, M., Wei, L., Gao, Y., Ruan, Y., Wang, Q., & Zhang, Z. (2023).** Changes in soil chemical properties and rhizosphere bacterial community induced by soil amendments associated with reduction in cadmium accumulation by rice. *Agronomy*, 13(12), 3051.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13123051>
- Yang, Y., Wei, X., Lu, J., You, J., Wang, W., & Shi, R. (2010).** Lead-induced phytotoxicity mechanism involved in seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*,

73(8): 1982-1987.

Yang, Y., Zhang, Y., Wei, X., You, J., Wang, W., Lu, J., & Shi, R. (2011). Comparative antioxidative responses and proline metabolism in two wheat cultivars under short term lead stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74, 733-740.

Zhou, P., Adeel, M., Shakoor, N., Guo, M., Hao, Y., & Azeem, I. (2021). Application of nanoparticles alleviates heavy metals stress and promotes plant growth: An overview. *Nanomaterials*, 11, 26-38.